

**COMPARACIÓN DE UN LECHO DE GRAVA Y UN HUMEDAL DE FLUJO
SUBSUPERFICIAL CON *Typha latifolia* PARA EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS DE COMBUSTIBLE LIQUIDO**



**CARLOS ALBERTO MÁRQUEZ LLANOS
JOHANNA PAOLA VELÁSQUEZ FORTICH**

**UNIVERSIDAD DE CORDOBA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA AMBIENTAL
MONTERIA-CORDOBA**

2017

**COMPARACIÓN DE UN LECHO DE GRAVA Y UN HUMEDAL DE FLUJO
SUBSUPERFICIAL CON *Typha latifolia* PARA EL TRATAMIENTO DE
RESIDUOS DE COMBUSTIBLE LIQUIDO**

**CARLOS ALBERTO MÁRQUEZ LLANOS
JOHANNA PAOLA VELÁSQUEZ FORTICH**

**Propuesta presentada, en la modalidad de Trabajo de Investigación y/o Extensión,
como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Ambiental.**

Director

GABRIEL ANTONIO CAMPO DAZA, Esp.

**Grupo de investigación de biotecnología. Departamento de Química y Biología
GRUBIODEQ**

**UNIVERSIDAD DE CORDOBA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA AMBIENTAL
MONTERIA-CORDOBA**

2017

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

*A Dios por brindarme la oportunidad de conocer grandes personas que ayudaron para
alcanzar este logro.*

*A mis padres Ana y Jhon por su amor, formación, dedicación y apoyo incondicional en
cada una de las etapas de mi vida.*

A mi hermanita Paula Velásquez

*A mi compañero Carlos Márquez Llanos por su amistad y confianza en asumir este reto
juntos.*

Johanna

*A Dios por brindarme las mejores personas del mundo que fueron un apoyo constante
durante todo este proceso*

*A mis padres Jaqueline y Rúber por ser un ejemplo de dedicación, perseverancia,
lealtad y todos los valores inculcados, formándome como un hombre de bien*

*Y a mi compañera y amiga Johanna quien aceptó sin dudar tomar este reto como una
aventura que hoy se convierte en un sueño cumplido*

Carlos

Agradecimiento especial a:

A nuestro querido director el Ingeniero Gabriel Antonio Campo Daza, por la confianza depositada y todo el apoyo durante este proceso.

Al Ph.D. Luis Oviedo Zumaqué, a los miembros del laboratorio de Biotecnología y al Grupo de Investigación de Biotecnología de la Universidad de Córdoba por el apoyo incondicional en todo.

A nuestro equipo de trabajo Yisel Salazar y Jesús Laverde.

Agradecimientos:

Al Departamento de Ingeniería Ambiental por brindarnos todas las herramientas necesarias para nuestra formación como ingenieros Ambientales

A la facultad de ciencias agrícolas, en especial al personal encargado de la planta piloto de biocompostaje de la Universidad de Córdoba.

A la empresa de Alquiler y Suministro S.A. Del municipio de Cereté

Al laboratorio de Agua y al laboratorio de toxicología y gestión ambiental de la Universidad de Córdoba

A Lina, Anita y a nuestros compañeros y amigos por la amistad y el apoyo durante todos estos años de estudio.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
1 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	16
1.1 ESTADO DEL ARTE	16
1.2 MARCO CONCEPTUAL	19
1.2.1 Humedal artificial	19
1.2.2 Taxonomía de la planta <i>T. latifolia</i>	20
1.2.3 Residuos de combustible líquido	21
1.2.4 Análisis costo - efectividad	21
1.3 MARCO LEGAL	21
2 MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1 LOCALIZACIÓN	23
2.2 TIPO DE ESTUDIO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	24
2.3 MATERIALES	24
2.4 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES	27
2.5 TABLA DE IDENTIFICACIÓN	28
2.6 DISEÑO METODOLOGICO	29
2.6.1 Determinación del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos durante el tratamiento.	29
2.6.2 Estudio del desarrollo fisiológico de la especie vegetal plantada.	29
2.6.3 Cálculo de eficiencia de remoción de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) de los sistemas de tratamiento.	31

2.6.4	Análisis Costo – Efectividad de los sistemas para el tratamiento de hidrocarburos totales de petróleo.	31
2.7	DISEÑO EXPERIMENTAL	32
3	RESULTADOS Y DISCUSIONES	35
3.1	ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS EN LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTOS	35
3.1.1	Estudio del comportamiento del pH	35
3.1.2	Estudio del comportamiento del Potencial de Oxido Reducción	37
3.1.3	Estudio del comportamiento de la Temperatura	38
3.2	ANÁLISIS EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE LA <i>T. latifolia</i> EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO	40
3.2.1	Porcentaje de masa seca (Biomasa)	40
3.2.2	Índices de crecimiento de la fisiología vegetal de <i>T. latifolia</i>	43
3.3	EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES.	45
3.3.1	Análisis de varianza entre los sistemas de tratamiento con respecto a la concentración de Hidrocarburos totales de petróleo	48
3.4	ANÁLISIS DE LA RELACIÓN COSTO-EFECTIVIDAD DE LA REMOCIÓN DE RESIDUOS DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO	52
4	CONCLUSIONES	54
5	RECOMENDACIONES	55
6	BIBLIOGRAFÍA	56
7	ANEXOS	61

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. Prueba de porosidad para determinación del volumen teórico en los sistemas de tratamiento.	61
ANEXO B. Formato de recolección de datos en campo y en laboratorio	63
ANEXO C. Resultados de análisis de variables fisicoquímicas tomadas en campo.	64
ANEXO D. Verificación estadística de los supuestos para la aplicación de la prueba ANOVA a los parámetros fisicoquímicos.	64
ANEXO E. Correlación de las variables medidas para el análisis de crecimiento de la especie vegetal.	70
ANEXO F. Resumen de índices de crecimiento de la <i>T. latifolia</i> en el sistema de tratamiento.	70
ANEXO G. Graficas de las correlaciones de las variables que se emplearon para el análisis de crecimiento de la <i>T. latifolia</i> en el sistema de tratamiento	71
ANEXO H. Informe de resultados de hidrocarburos totales de petróleo del laboratorio de toxicología y gestión ambiental de la Universidad de Córdoba	72
ANEXO I. Resumen de los resultados de laboratorio de la determinación de hidrocarburos totales de petróleo	74
ANEXO J. Graficas de correlación entre la concentración de HTP con respecto a las variables fisicoquímicas	74
ANEXO K. Imágenes de los montajes de los sistemas de tratamiento	76
ANEXO L. Tabla de costos realizados para la construcción y mantenimiento de cada uno de los sistemas de tratamiento y tabla de efectividad en cada uno de los sistemas.	80

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pag.
Ilustración 1. Localización de la Universidad de Córdoba (Sede central) donde se desarrolló la etapa experimental del proyecto.	23
Ilustración 2. Dimensiones de diseño de los humedales y el sistema de recolección de muestras en centímetros.	24
Ilustración 3. Localización del punto donde se realizó la recolección de las plantas que se sembraron en el humedal plantado.	26
Ilustración 4. Gráfico del pH tomado en campo durante los muestreos.	36
Ilustración 5. Gráfica del potencial de óxido reducción tomados en campo durante los muestreos.	38
Ilustración 6. Gráfica de la temperatura tomada en campo durante los muestreos.	39
Ilustración 7. Gráfica de variación multitemporal del porcentaje de masa húmeda y seca medidas en laboratorio de las muestras de los sistemas de tratamiento.	41
Ilustración 8. Gráfico de relación entre el pH y el porcentaje de masa seca del cultivo	41
Ilustración 9. Gráfico de relación entre el potencial de óxido reducción y el porcentaje de masa seca del cultivo.	42
Ilustración 10. Gráfico de relación entre la temperatura y el porcentaje de masa seca del cultivo.	43
Ilustración 11. Gráfica de la variación de la Tasa de crecimiento relativo durante el tiempo de estudio.	44
Ilustración 12. Gráfica de la variación de la Tasa absoluta de crecimiento durante el tiempo de estudio.	45
Ilustración 13. Gráfica de los resultados de hidrocarburos totales de petróleo.	46
Ilustración 14. Gráfico de correlación entre el potencial de óxido reducción con respecto a las concentraciones de HTC en el sistema sin plantar	47
Ilustración 15. Gráfico de correlación entre el potencial de óxido reducción con respecto a las concentraciones de HTC en el sistema plantado.	48
Ilustración 16. Gráfico de normalidad de los residuos de observación.	49
Ilustración 17. Gráfico de los residuos de observación vs los predichos.	50

Ilustración 18. Gráfico de independencia de los residuos.	50
Ilustración 19. Gráfico de ANOVA aplicado a los bloques y los sistemas de tratamiento.	51
Ilustración 20. Plano de coste-efectividad de los sistemas de tratamiento.	53

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Tabla resumen de las variables que intervienen en el proyecto	27
Tabla 2 Tabla de identificación del proyecto	28
Tabla 4. Diseño experimental de la investigación	32
Tabla 5. Montajes del experimento	32
Tabla 6. Hipótesis nula e hipótesis alterna del proyecto	33
Tabla 8. Tabla ANOVA para los datos de pH en cada uno de los tratamientos.	37
Tabla 9. Tabla ANOVA para los datos de Potencial de Oxido reducción en cada uno de los tratamientos.	38
Tabla 10. Tabla ANOVA para los datos de Temperatura en cada uno de los tratamientos.	39
Tabla 11. Resumen del muestreo de plantas del sistema de tratamiento	40
Tabla 13. Porcentaje de remoción de HTP para cada uno de los sistemas entre los muestreos.	46
Tabla 14. Resumen Estadístico para los residuos de observación	49
Tabla 15. Análisis de varianza de la concentración de HTP- Suma de Cuadrados Tipo III	51
Tabla 16. Análisis del coste-efectividad de los sistemas de tratamiento	52

RESUMEN

En este estudio se compararon tres (3) sistemas de tratamiento, un humedal subsuperficial con *T. latifolia*, un humedal subsuperficial sin plantas y un humedal superficial (Blanco), con respecto a la remoción de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) en residuos de combustible líquido producidas por la empresa Alquiler y Suministros S.A. De Cereté - Córdoba. Para ello se estudió el comportamiento temporal de variables fisicoquímicas como el pH, el potencial de óxido reducción y la temperatura, en el agua tratada por los sistemas planteados. El comportamiento de estas variables no presentó diferencias significativas entre los tres (3) sistemas; otro factor estudiado fue la fisiología de la especie vegetal plantada en uno de los humedales, identificando que esta se vio influenciada por el contaminante y que aportó a que las condiciones fisicoquímicas fueran un poco más controladas que en los demás sistemas. Con ayuda de estos análisis se procedió entonces a realizar la comparación de eficiencias para la remoción de HTP en cada uno de los sistemas, llegando al resultado mediante pruebas estadísticas que no hubo diferencia significativa entre los sistemas, pero al realizar un análisis costo efectividad, relacionando los costos de construcción y mantenimiento durante el tiempo de estudio con la remoción de contaminante, se encuentra como resultado final que el mejor sistema de tratamiento es el sistema sin plantar, con una remoción de 91,97% y una relación costo – efectividad de \$30 COP por $\mu g * ml^{-1}$ de HTC removido.

Palabras Clave: Humedal artificial, Hidrocarburos totales de petróleo, Parámetros fisicoquímicos, eficiencia de remoción, análisis costo efectividad.

ABSTRACT

In order to compare the Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) from the company Alquiler y Suministros S.A. removal capacity of tree treatment systems, a Subsurface wetland with *T. latifolia*, another Subsurface wetland without plants and a Surface wetland (control), we studied the temporal behavior of Physicochemical variables like temperature, pH and potential Redox in the water treated by the systems proposed, the results didn't present differences between the tree systems. Another studied factor was the physiology of the planted plant species in one of the wetlands, finding that it was influenced by the pollutant and contributed to the fact that the physicochemical conditions were a little more controlled than in the other systems. With all those analysis we compare the TPH removal capacity in each system, there were no difference by statistical tests, but after doing a cost effectiveness analysis, comparing construction costs and maintenance during the study time with the removal of pollutant, the best system is the Subsurface wetland without plants with a removal capacity of 91,97% and a relationship cost – effectiveness of \$30 COP por $\mu g * ml^{-1}$ per HTC removed

Keywords: Constructed wetland, Total petroleum hydrocarbons, Physicochemical parameters, removal efficiency, cost effectiveness analysis.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el desarrollo de nuestra sociedad ha ido ligado a la producción y utilización de hidrocarburos, siendo estos contaminantes del medio ambiente, principalmente del agua. Los hidrocarburos son utilizados principalmente como combustible para motores de automóviles, camiones, motobombas, entre otros. En su almacenamiento y transporte se generan residuos con altas concentraciones de hidrocarburos que podrían llegar a ser un medio de contaminación para cuerpos de aguas como ríos y quebradas; también puede ser un contaminante para el suelo, y por su capacidad de volatilización puede contaminar el aire (Moral Luque 2002).

La contaminación de agua por hidrocarburos, tanto en fuentes subterráneas como superficiales, es un hecho que crece por motivos de la explotación, refinación, distribución y almacenamiento de petróleo y sus derivados que son principalmente utilizados como combustibles. Cuando se contamina el agua con estas sustancias produce cambios en las características del medio, generando graves daños en ecosistemas asociados al recurso agua, y también deteriorando considerablemente la calidad del agua disponible para el consumo humano y para el proceso de potabilización del mismo.

En la actualidad uno de los sistemas que más se recomiendan para el tratamiento de aguas contaminadas son los humedales artificiales, estos sistemas tienen la capacidad de depurar el agua residual de actividades domésticas o industriales, tienen como característica principal la no implementación de sustancias químicas y el poco impacto visual que tienen, los humedales artificial de flujo subsuperficial, tienen como principales ventajas de que ocupan un menor espacio, gastan menor tiempo en su operación y la no generación

de vectores que puedan generar enfermedades como zancudos y jejenes (García Serrano y Corzo Hernández 2008). El lecho, las plantas y los microorganismos son quienes realizan el proceso de purificación y por tanto son los entes importantes a estudiar. Es importante determinar la eficiencia de la Enea en sistemas de tratamientos no convencionales para el tratamiento de aguas hidrocarburadas como una alternativa para sectores productivos específicos.

De la investigación se espera obtener como resultado la capacidad de remoción que posee la enea para la depuración de aguas contaminadas por borras hidrocarburadas, para esto se utilizaron tres (3) sistemas de tratamiento con configuraciones diferentes, donde uno fue un blanco que estuvo constituido por agua y borra, diluido a una concentración del 3% de todo el medio, el siguiente sistema fue un humedal de flujo subsuperficial sin plantar con grava, y el último sistema fue un humedal de flujo subsuperficial plantado con la especie vegetal *T. latifolia* e igual dilución de la borra en el medio.

Para el estudio de la eficiencia en la remoción de hidrocarburos totales de los sistemas se plantearon cuatro (4) objetivos, estos fueron, la determinación de parámetros fisicoquímicos en cada uno de los sistemas de tratamientos, el análisis el Crecimiento del cultivo de la *T. latifolia* en el sistema de tratamiento, la determinación de la eficiencia de degradación de hidrocarburos totales en cada uno de los sistemas de tratamiento y finalmente desde el punto de vista económico se estimó la relación Costo-efectividad de la remoción de residuos de combustible líquido de los sistemas de tratamiento.

1 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

1.1 ESTADO DEL ARTE

El agua para los seres humanos ha sido el recurso que más importancia ha tenido, razón por la cual los asentamientos humanos generalmente se encuentran en la riberas de los cuerpos hídricos ya sean de naturaleza lítica o léntica, siendo estas fuentes de agua tanto el suministro como el vertedero de los procesos que se llevan en las comunidades. Generalmente los cuerpos lénticos como ciénagas, pantanos o lagunas son más susceptibles a ser contaminados y posteriormente destruidos, por el poco flujo de sus aguas, dándole así un riesgo potencial de eutrofizarse, sin embargo en el planeta existen muchas poblaciones que utilizaron este tipo de acuíferos como base fundamental de su desarrollo, exponiéndolos a los ya mencionados peligros. Por esto, se han adelantado diversas investigaciones para tratar el agua donde se emplee como alternativa a los humedales artificiales, estos han resultado ser una opción atractiva y competitiva como sistema de tratamiento de aguas residuales, asociados a un bajo costo de inversión, operación y mínimo consumo energético, con la capacidad de combinar procesos biológicos, químicos y físicos, cuyos mecanismos incluyen la adsorción, la precipitación química, y la absorción (Birch et al. 2006).

Desde el año de 1912, algunos investigadores comenzaron las construcciones de humedales, basados en las observaciones de la capacidad de tratamiento de los humedales naturales. Los estudios sobre humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales, se iniciaron en la década del cincuenta en el Instituto Max Planck en Alemania y fueron desarrollados en los años setenta y ochenta. En los años noventa se observó un incremento en el número de estos sistemas, dado que la aplicación ya se expandía, no solo

para tratamiento de agua residual municipal, sino también para aguas de pluviales, industrial y residuos agrícolas. (Velasco y Espinosa 2010).

En Francia durante el año 1999, un grupo de investigadores liderado por C. Salmon, desarrollaron un proyecto en el cual evaluaron la eficiencia de remoción de hidrocarburos totales implementando sistemas de humedales artificiales de flujo superficial, utilizando como plantas la *T. Latifolia* y *Lemna Minor* obteniendo resultados de alta eficiencia (Salmon et al. 1998).

En Brasil durante el año 2000 Corseuil y Moreno, desarrollaron a escala laboratorio la fitorremediación, como una alternativa de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con gasolina mezclada con etanol, utilizando como planta de cultivo el Sauce reduciendo valores mayores del 99% de benceno y etanol, mostrando así la alta viabilidad de la fitorremediación en la asimilación de hidrocarburos (Corseuil & Moreno 2000).

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial, utilizando como especie vegetal a la *T. latifolia* se han usado para evaluar la remoción de hidrocarburos de aguas residuales con iguales concentraciones de diésel alcanzando remociones mayores al 60% pero evidenciando en la investigación una gran influencia de los factores de remoción como el sustrato y la actividad microbiana (Omari et al. 2003). Otro ejemplo donde la mayor remoción estuvo determinada por el lecho fue el resultado obtenido por Fountoulakis y compañía en el año 2009, en donde se implementaron 3 sistemas para el tratamiento de aguas hidrocarbурadas, humedal de flujo subsuperficial plantado con 2 tipos de especies (*Phragmites australis* y *Arundo donax*), un humedal superficial con agua y un filtro de grava, siendo este último el de mayor rendimiento (Fountoulakis et al. 2009).

En Colombia una de las investigaciones que se realizó sobre fitorremediación implementando humedales artificiales fue la desarrollada por Cubillos en el año 2011, donde evaluó varios tipos de humedales (de flujo superficial y flujo subsuperficial plantado y de flujo subsuperficial sin plantar) utilizando *Phragmites australis*. En donde se demostró que las macrófitas utilizadas no soportaron las concentraciones de hidrocarburos totales y perecieron durante el proceso, dando como resultado que la remoción obtenida se dio principalmente al lecho y posiblemente a microorganismos.

Pulgarín en el año 2012, realizó en Colombia una investigación donde comparó 3 plantas con el fin de identificar cuál de las tres plantas tenía una mayor capacidad de asimilación de hidrocarburos totales, donde obtuvo como resultado que la *Phragmites* poseía mayor tolerancia y remoción que las especies *T. latifolia* y la *Cyperus papyrus* de las cuales la segunda no removió una cantidad significativa de hidrocarburos totales para el estudio (Pulgarín 2012).

En el año 2005 se demostró mediante un estudio que la implementación de humedales plantados es una opción viable para la remoción de cianuro e hidrocarburo en aguas subterráneas, removiendo 67% de los compuestos orgánicos presentes en la gasolina y el diésel, utilizando *Ceratophyllum demersum* y *Potamogeton spp* (Gessner et al. 2005).

En estas investigaciones se han establecido varias metodologías tanto sistemas superficiales, subsuperficiales con flujo horizontal y vertical, con matriz de suelos, y usando plantas. En estos diversos sistemas de tratamientos apuntan a los humedales subsuperficiales de flujo horizontal con plantas, como el tratamiento prometedor en cuanto a su desempeño relacionado con la remoción de hidrocarburos totales.

En el campo de la fitorremediación utilizando humedales artificiales, el desarrollo de las plantas cultivadas para el tratamiento es un factor crucial, que no solo determina la asimilación del contaminante sino la recuperación de un espacio intervenido. El hecho que un cultivo de una especie resulte eficiente, es un significado de que se presenta la asimilación de la sustancia contaminante o simplemente una tolerancia a ella, lo cual puede ser también visto como un resultado positivo. Rincón, et al. En el año 2012 desarrollaron una investigación donde demostraron que mediante el uso de instrumentos cotidianos como una cámara fotográfica y un software de fácil manejo se puede realizar un análisis en lo referente al crecimiento de una planta. Esta información insumo puede ser procesada para el cálculo de variables como Tasa relativa de crecimiento (TRC), Tasa de crecimiento del cultivo (TCC), Tasa de Asimilación Neta (TAN) o el Área foliar Específica (AFE).

1.2 MARCO CONCEPTUAL

1.2.1 Humedal artificial

Existen diferentes tipos de tratamientos para aguas contaminadas, de tipo convencional como las tradicionales lagunas de oxidación, plantas de tratamiento, reactores anaerobios, entre otros. También existen sistemas de tratamiento no convencionales como los sistemas alimentados por fuentes de energía alternativa o para el tratamiento de contaminantes específicos, dentro de esta categoría se encuentran los sistemas de humedales artificiales, que por la práctica implementación de diferentes especies vegetales o composiciones en el lecho. Los humedales artificiales presentan una variedad de funcionamiento, pueden ser de flujo vertical u horizontal, además de poseer un flujo superficial o un flujo subsuperficial.

Los humedales de flujo superficial son diseñados para simular las condiciones de un humedal natural en el cual, el medio filtrante es de poca altura y la lámina de agua se encuentra expuesta a la atmósfera, es decir, el nivel del agua está por encima del medio de soporte o material filtrante. Generalmente este humedal tiene plantas emergentes distribuidas a lo largo del sistema, proporcionando oxígeno en las zonas profundas, dado que por su tipo de flujo se presentan ambientes aerobios en la superficie y ambientes anaerobios en el subsuelo. El agua en este humedal corre a bajas velocidades de forma horizontal y así mismo es evaporada debido a su exposición a la atmósfera (Cubillos Vargas 2011).

Los humedales de flujo subsuperficial son un tipo de sistemas donde circula el agua contaminada a través de una matriz de suelo y de las raíces de las plantas interactuando con ellas, con las bacterias que se encuentran en los rizomas de las plantas y en el sustrato, estos sistemas pueden tener diferentes direcciones del flujo pues pueden moverse de forma horizontal o vertical según sea el diseño del humedal, esto puede variar según el tipo de contaminante a tratar, y según la dinámica del humedal. (García Serrano & Corzo Hernández 2008)

Los humedales artificiales en general son un reactor, siendo estos un dispositivo donde ocurre un cambio en la composición debido a la reacción química, por lo tanto es cualquier recipiente donde ocurre una reacción química. Se clasifican según su operación en,

discontinuo, continuo de mezcla completa, semicontinua y continua de flujo pistón (Cuevas García 2009)

Los reactores de cochada se caracterizan por no tener un afluente ni un efluente. Es un reactor donde la dispersión es infinita, se constituye como un sistema cerrado que se utiliza en experimentos a escala de laboratorio a medida que la reacción ocurre en el reactor, la composición relativa de los reactantes y los productos cambia en función del tiempo, teniendo como principal característica la concentración uniforme en todo el reactor (Romero 2004).

1.2.2 Taxonomía de la planta *T. latifolia*

Para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas contaminadas implementando humedales artificiales, las plantas toman un papel importante en el proceso de remoción de contaminantes. La *T. latifolia* o comúnmente llamada Enea, Chuspata, Espadaña, Junco masa de agua, plumilla o tule ancho, es una especie de planta hidrófita enraizadas emergente con las cuales se ha intentado experimentar por su alta resistencia a los contaminantes, porque estas encuentran su hábitat en ambientes contaminados, aunque se considerada una plaga por su fácil dispersión de la semilla en el viento. (Bonilla Barbosa & Santamaria Araúz 2014). La *T. latifolia* pertenece a la familia Typhaceae, de hábito hierba perenne, esta una planta propia del borde del agua, crece a un tamaño máximo: 2,5 metros florece siempre en el verano (Menone, et al. 2015). Entre las hojas emerge una especie de tallo sobre el que se agrupan las flores en espiga cilíndrica compacta, de color castaño. La de arriba es la flor masculina que después de largar el polen se secará; la de abajo, separada por un corto raquis, es la flor femenina que la gente de campo cosecha y utiliza como "espiral" repelente de mosquitos, o como adorno. La Enea es una planta que tolera los Hidrocarburos en llanuras boreales de la ecozona; otras especies han sido investigadas en diferentes concentraciones de hidrocarburos (Frick et al. 1999), por ejemplo otros autores encontraron que la *Mirabilis jalapa* L. puede ser usada en la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos con concentraciones ≤ 10.000 mg/kg (Peng et al. 2009); hallaron que las especies *Salix exigua*, *Populus spp.*, *Tripsacum dactyloides*, *Sagittaria latifolia*, *Panicum virgatum* y *Carex stricta* presentan un gran

crecimiento radicular que favorece las condiciones de crecimiento de la planta y la degradación del hidrocarburo en concentraciones entre 30 y 80 mg/kg (Euliss et al. 2008).

1.2.3 Residuos de combustible líquido

En el sector de la venta de combustible se generan residuos líquidos como producto de actividades de lavado de pisos, derrames y pérdidas de combustible, solventes, aceites y grasa, manutención de vehículos y aguas lluvias. En el almacenamiento y transporte de combustible se generan también otros residuos que son sólidos en suspensión como la borra que es un precipitado que se deposita en el fondo de los tanques cisterna. Estos residuos están compuestos además de sus elementos naturales, también por desengrasantes, detergentes y ceras especiales producto del lavado de los equipos (Ñustez Cuartas 2012).

1.2.4 Análisis costo - efectividad

Los análisis de costo – efectividad, son una herramienta útil para el análisis comparativo entre varios sistemas, para saber si la aplicación de las alternativas tienen un rendimiento de efectividad que se sustente en valores económicos, según lo manifiestan autores como Prieto en el 2004. Un factor primordial para la aplicación de este tipo de análisis es que permite relacionar cuantitativamente la eficiencia de cada tratamiento con los costos que estos implican, y la principal razón por la que surge esta metodología económica para evaluar las alternativas desde el punto de vista económico, es cuando no es cuantificable el beneficio que este genera en términos económicos y se aplica ampliamente en el sector de la salud donde es imposible cuantificar los beneficios que pueden tener los tratamientos, y también es aplicable al sector de los estudios medio ambientales donde es difícil la valorización y la existencia de un mercado para los recursos naturales.

1.3 MARCO LEGAL

Según la normatividad colombiana el sector industrial le corresponde ciertas responsabilidades con respecto a los vertimientos que generen según su actividad como se encuentra establecido en el Decreto Único Ambiental 1074 de 2015 Sección 23

Vertimiento por uso industrial. Artículo 2.2.3.2.23.1. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

El trabajo de investigación busca fundamentar el funcionamiento teórico de un sistema de tratamiento no convencional para el tratamiento de aguas industriales contaminadas principalmente con hidrocarburos relacionándose con el Capítulo VIII Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos del Decreto 3930 del 2010 en el cual se reglamenta el uso del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 LOCALIZACIÓN

La investigación se llevó a cabo en la planta piloto de biocompostaje perteneciente a la facultad de ciencias agrícolas de la Universidad de Córdoba localizado en las coordenadas: 8°47'30.73"N; 75°51'34.39"O (Véase Ilustración 1).

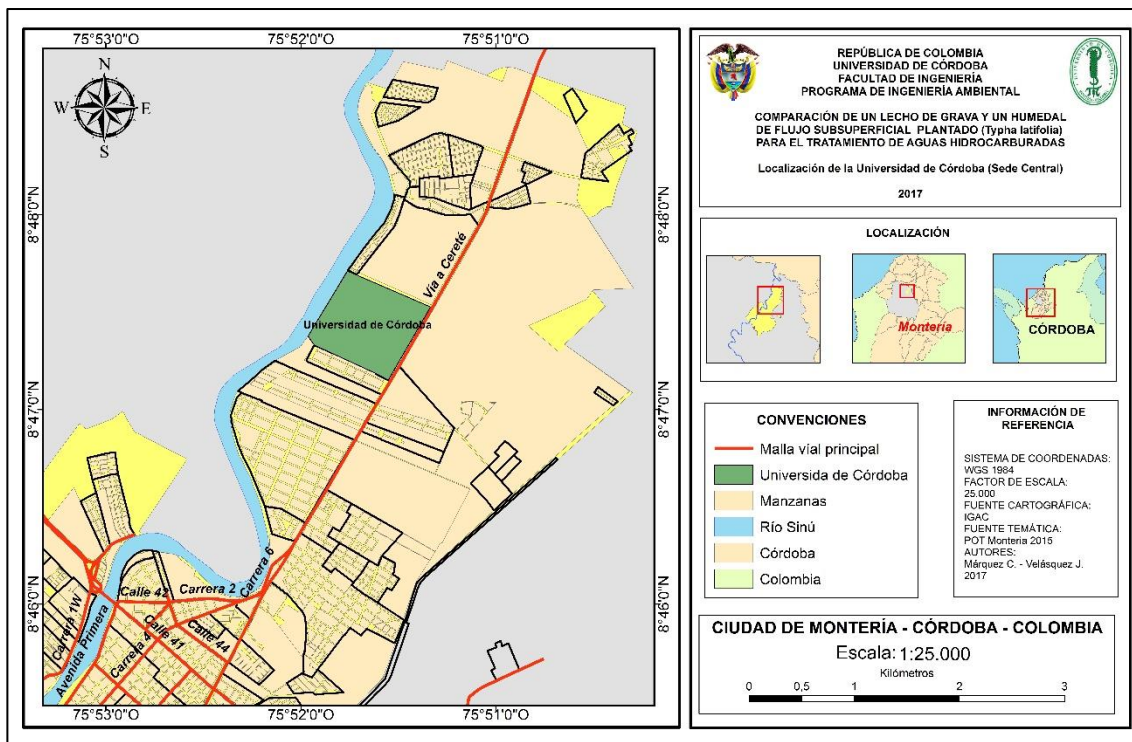


Ilustración 1. Localización de la Universidad de Córdoba (Sede central) donde se desarrolló la etapa experimental del proyecto. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

2.2 TIPO DE ESTUDIO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación se llevó a cabo mediante un tipo de estudio cuasi experimental porque no hubo control sobre las variables meteorológicas, que pudieron influenciar en los resultados obtenidos. Se buscó indagar la efectividad que posee los sistemas de tratamiento para la remoción de residuos líquidos de combustibles, mediante el uso de tres (3) humedales artificiales. La metodología investigativa que se desarrolló a lo largo del proyecto fue una metodología deductiva, que permitió mediante investigaciones previas y pruebas de laboratorio, implementar conceptos pertenecientes a las áreas de la biología, ecología, química y contaminación y control de aguas.

2.3 MATERIALES

Los materiales que intervienen de forma esencial en el montaje experimental del proyecto son: Los humedales, la grava, las plantas y el agua.

Los tres (3) humedales están contenidos en un recipiente de fibra de vidrio, con dimensiones de 150 cm de largo por 50 cm de ancho y 80 cm de alto, con un borde libre de 10 cm, teniendo así una altura efectiva de 70 cm. El recipiente cuenta con 4 salidas a diferentes alturas y además de ello se le instaló un sistema de recolección de muestras, que está constituido por tuberías de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada en forma de “T” invertida a tres (3) diferentes alturas, con perforaciones en la parte inferior que permitan la recolección en diferente estratos del medio (Véase ANEXO K, Ilustración 2)

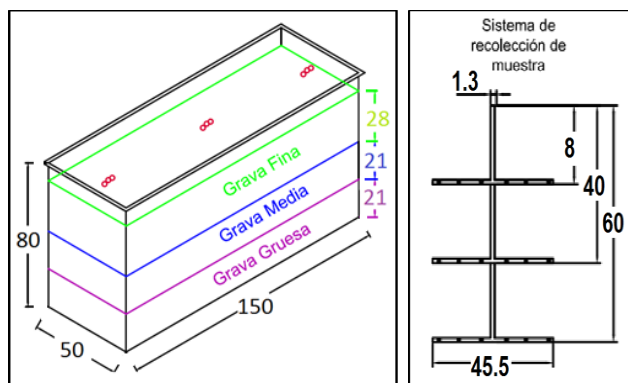


Ilustración 2. Dimensiones de diseño de los humedales y el sistema de recolección de muestras en centímetros. Fuente: Grupo de trabajo, 2017.

La grava que se utilizó para crear el medio fue grava aluvial procedente del Río Sinú de acuerdo a lo recomendado en el Manual de construcción: Humedales construidos para el tratamiento de aguas negras (Setti, 2014) conocida en el medio de la construcción como piedra china o como canto rodado. Se utilizaron tres (3) diferentes rangos de diámetro de la grava, teniendo grava gruesa con unos diámetros entre 26 mm – 40 mm, grava media con diámetros entre 16 mm – 25 mm y grava fina con diámetros entre 6 mm – 15 mm. La distribución de la grava en los humedales fue la siguiente: Medido en forma ascendente de 0 cm a 21 cm se utilizó grava gruesa, de 21 cm a 42 cm se utilizó grava media y de 42 cm a 70 cm se utilizó la grava fina como se observa en la Ilustración 2.

Las plantas sembradas en el humedal fue la especie vegetal *T. Latifolia*, es una especie vegetal de la cual se tiene referencia de su resistencia a ambientes contaminados. Las plantas recolectadas fueron extraídas de humedales naturales locales de la ciudad de Montería – Córdoba en la urbanización El Limonar localizado en la vía que conduce al municipio de Planeta Rica – Córdoba (Véase Ilustración 3). El criterio para la selección de las especies a recolectar fue su tamaño el cual no debía ser superior a 50 cm porque así se facilitaba la extracción de la planta junto a sus raíces. Se sembraron en el humedal 23 plantas el día inmediatamente siguiente a su recolección, se procedió a llenar con agua hasta el punto tal que el agua no sobrepasara el sustrato y posterior a ello hubo un tiempo de adaptación de 1 mes antes de contaminar del medio.

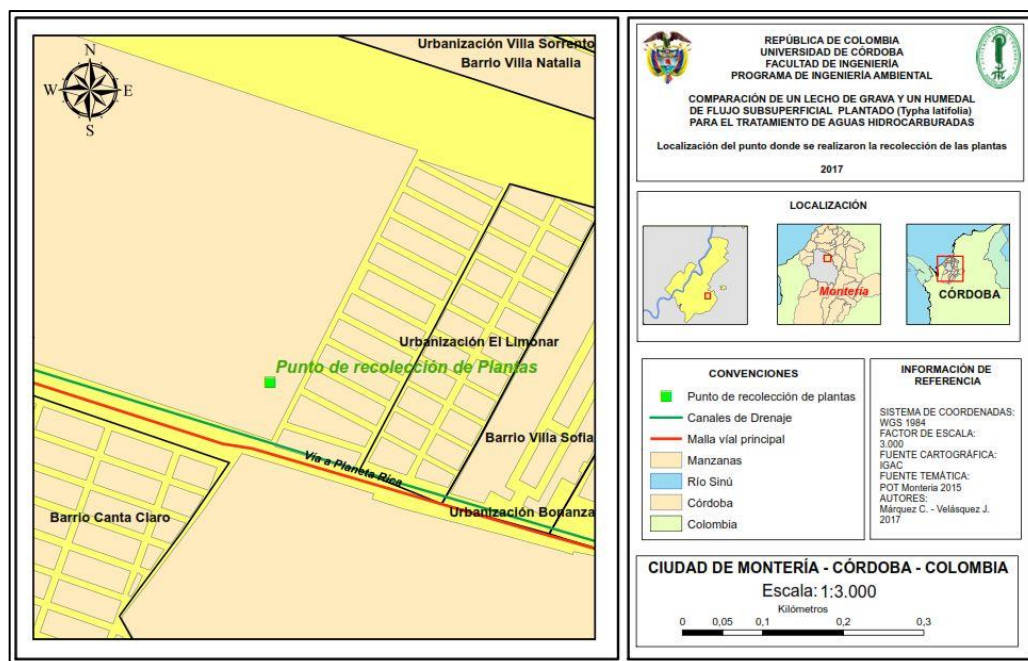


Ilustración 3. Localización del punto donde se realizó la recolección de las plantas que se sembraron en el humedal plantado. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

El agua que se trató en el sistema de humedales fue captada del distrito de riego de Mocarí, que irriga los cultivos experimentales y comerciales de la Universidad de Córdoba. El volumen de agua que se vertió en los humedales corresponde al 39,5% del volumen total del medio. Este porcentaje corresponde al espacio poroso total del sustrato, para su determinación se aplicó la prueba de porosidad, véase ANEXO A. El residuo líquido de combustible con que se contaminaron los medios provino de un almacenaje de residuos de la empresa Alquiler y Suministros S.A. Cereté, siendo este residuo resultado de la limpieza de los tanques cisternas de transporte combustible de ACPM.

2.4 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

A continuación se presentan las variables dependientes e independientes que intervinieron en el proceso investigativo para la realización del proyecto.

Tabla 1 Tabla resumen de las variables que intervienen en el proyecto

Tipo de Variable	Clasificación	Operacionalización	Índices
Independiente			
Concentración de hidrocarburos totales de petróleo	Humedal artificial de flujo subsuperficial plantado Humedal artificial de flujo subsuperficial sin plantar Humedal artificial de flujo superficial sin plantar	-	$\mu g\ ml^{-1}$
Costos de construcción y operación de cada sistema	La inversión económica que representó la construcción y operación de los sistemas	-	COP
pH, Potencial de Oxido reducción, Temperatura	Variación de parámetros fisicoquímicos	-	Unidades de pH, mV, °C
Peso seco	Peso de la planta después del proceso de deshidratación	-	g
Dependiente	Criterio de Análisis	Operacionalización	Índices
Eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento para aguas contaminadas con residuos líquidos de combustible	Variación porcentual de la concentración de hidrocarburos totales desde la entrada de la muestra al sistema hasta su salida y control de parámetros fisicoquímicos	$\%Remoción\ HT = \frac{HT_{in} - HT_{out}}{HT_{in}} * 100$	%
Análisis de crecimiento del cultivo la especie vegetal (<i>T. latifolia</i>)	Tasa relativa de crecimiento (TRC)	$TCR = \frac{\ln(w_2) - \ln(w_1)}{t_2 - t_1}$	$g \cdot d^{-1}$
	Tasa Absoluta de crecimiento (TAC)	$TAC = \frac{(W_2 - W_1)}{T_2 - T_1}$	$g \cdot (g\ d)^{-1}$
Análisis coste-efectividad	Relación entre los costos de construcción y operación de cada sistema con respecto a la disminución de la concentración del contaminante	$CE = \frac{Costos}{\Delta [HTC]}$	$COP * (\mu g \cdot ml^{-1})^{-1}$

2.5 TABLA DE IDENTIFICACIÓN

A continuación se presenta el resumen de la estructura del proyecto para su ejecución.

Tabla 2 Tabla de identificación del proyecto

Problema de investigación	Pregunta de investigación	Hipótesis	Variables Dependientes (VD)			Variables Independiente (VI)	Unidades	
			Tema de investigación	Criterios de análisis (Categoría)	Criterios de selección (Definición operacional)	Variables	VD	VI
Incertidumbre sobre eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento de residuos líquidos de combustible	¿Cuál es el sistema de tratamiento de humedales artificiales más eficiente para la remoción de residuos de combustible líquido?	El sistema tratamiento más eficiente para la remoción de hidrocarburos totales implementando humedales artificiales es: Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal con lecho de grava sin plantar Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal con lecho de grava plantado con la especie vegetal T. Latifolia	Comparación de un lecho de grava y un humedal de flujo subsuperficial plantado (T. latifolia) para el tratamiento de residuos de combustible líquido	Análisis funcional o dinámico del cultivo	Tasa relativa de crecimiento (TRC) Tasa Absoluta de crecimiento (TAC)	Peso seco	$\frac{g}{d}$ $\frac{g}{(g\ d)^{-1}}$	g
				Eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento para residuos líquidos de combustible	Variación porcentual de la concentración de hidrocarburos totales desde la entrada de la muestra al sistema hasta su salida y control de parámetros fisicoquímicos.	Concentración de hidrocarburos totales removidos por la especie vegetal	%	$\mu g \cdot ml^{-1}$
						pH Potencial de Oxido reducción Temperatura	-	Unidades de pH mV °C
				Análisis coste-efectividad	Relación entre los costos de construcción y operación de cada sistema con respecto a la disminución de la concentración del contaminante	Costos de construcción y operación de cada sistema	$COP^* (\mu g \cdot ml^{-1})^{-1}$	COP

2.6 DISEÑO METODOLOGICO

Las metodologías de muestreo que se aplicaron se realizaron durante 4 muestreos con frecuencia de 28 días, luego de 15 días al tomar el muestreo de referencia. Siendo en total 4 datos de muestreo del agua y plantas.

2.6.1 Determinación del comportamiento de los parámetros fisicoquímicos durante el tratamiento.

La medición del potencial de óxido reducción, temperatura y pH, se realizó en campo, inicialmente se extrajo la muestra y se depositó en un beaker de 200 ml, con la ayuda de un medidor multiparámetro HI9829 se sumergió la sonda del equipo en la muestra seleccionada durante 5 minutos, haciendo la captura de la información por cada 30 segundos. Este procedimiento se realizó 4 veces con 5 repeticiones durante 71 días que duró el tratamiento.

Se utilizó una planilla de campo donde se registraron todas las variables medidas en campo y en laboratorio, esta tabla se encuentra consignada en el ANEXO B.

Para el análisis de hidrocarburos totales de petróleo las muestras fueron recogidas y almacenadas en frascos ámbar de cuello angosto de 500 ml y se llevaron al laboratorio de toxicología y gestión ambiental de la Universidad de Córdoba.

2.6.2 Estudio del desarrollo fisiológico de la especie vegetal plantada.

En el proceso de remoción mientras se cumplen los tiempos de retención hidráulicos del sistema plantado, con una frecuencia de 28 días se realizó la selección al azar de varias plantas para determinar el porcentaje de masa seca o biomasa, y los índices de crecimiento en la fisiología vegetal. Usando como referencia el estudio de análisis de crecimiento de una especie vegetal que realizaron Castellanos y compañía (2009) donde analizaron entre otras variables los siguientes índices:

- Porcentaje de masa seca: Es la representación porcentual de la masa seca de la planta con respecto al peso total de la planta, esta variable también es denominada como biomasa, porque representa la cantidad de materia viva presente en la planta, para su cálculo se utilizó la siguiente formula:

$$\% \text{ de masa seca} = \frac{W}{W_t} * 100 \quad (1)$$

Donde:

W=Masa seca

W_t = Masa fresca

- La tasa de crecimiento relativo (TCR), la cual permite realizar comparaciones equitativas normalmente relaciona una parte de la planta con la masa seca total, se halló implementando la siguiente ecuación:

$$TCR = \frac{Ln(w_2) - Ln(w_1)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Donde:

W=Masa seca

t =Tiempo

- Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC), es la tasa de cambio en tamaño, o sea un incremento del tamaño por unidad de tiempo, se halló con la siguiente ecuación:

$$TAC = \frac{(W_2 - W_1)}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

Donde:

W=Masa seca

t =Tiempo

Para la determinación del peso seco, se extrajo la planta a la cual se aplicó el estudio fisiológico, luego se pesó en una balanza digital para determinar el peso fresco, se llevó la planta a un horno a 105°C durante 45 minutos, se volvió a pesar y la diferencia entre el primer peso y el segundo es el peso seco. Véase ANEXO K (Mendez Natera 2002).

Se graficaron los datos calculados de los índices de crecimiento y se relacionaron los datos de peso seco y tiempo con el software Excel. Estos datos se registran en el ANEXO F.

2.6.3 Cálculo de eficiencia de remoción de hidrocarburos totales de petróleo (HTP) de los sistemas de tratamiento.

Los cálculos de la eficiencia de remoción de cada sistema de tratamiento se determinaron utilizando la ecuación 3. Tomando como insumo las concentraciones determinadas por el análisis de laboratorio (ANEXO I).

$$\%Remoción\ HT = \frac{HT_{in} - HT_{out}}{HT_{in}} * 100 \quad (3)$$

Donde:

HT_{in} = Concentración de HTP en un tiempo inicial

HT_{out} = Concentración de HTP en un tiempo final

2.6.4 Análisis Costo – Efectividad de los sistemas para el tratamiento de hidrocarburos totales de petróleo.

Para analizar la variabilidad económica entre los sistemas tratamientos se realizó un análisis Costo-Efectividad, porque existe una dificultad para valorizar los beneficios, al no existir un mercado capaz de cuantificar los beneficios que posee un proyecto a esta escala.

Para determinar el análisis costo-efectividad de los sistemas de tratamiento de aguas contaminadas por residuos de combustible se aplicó una metodología, en donde los costos estuvieron representados por la inversión realizada en cada uno de los sistemas de tratamientos junto con su mantenimiento y análisis de laboratorio, y la efectividad se calculó con base a la disminución en la concentración del contaminante por cada sistema.

Para el cálculo del análisis de Costo-Efectividad por tratamiento se utilizó la siguiente fórmula (Prieto, et al. 2004):

$$CE = \frac{Costos}{\Delta [HTC]} \quad (4)$$

Donde

CE= Costo-efectividad, expresa el valor que tiene la remoción del contaminante en pesos colombianos por tratamiento.

Δ [HTC]= Diferencia que existe entre la concentración inicial y final de hidrocarburos totales de petróleo por tratamiento.

2.7 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño fue un DBCA (Diseño en bloques completamente aleatorio) unifactorial, para controlar la existencia de un margen de error mayor (Marínez Florez & Robles González 2011), por la falta de réplicas en el análisis de las muestras (Romero Mares 2013) para la determinación de hidrocarburos totales de petróleo.

Tabla 3. Diseño experimental de la investigación

Factor	Niveles	Tratamientos
Sistemas de tratamiento para la remoción de residuos líquidos de combustible	Humedal superficial sin plantar	3
	Humedal subsuperficial plantado	
	Humedal subsuperficial sin plantar	

Los arreglos serán los siguientes.

Tabla 4. Montajes del experimento

N°	Montaje	Descripción
1	Humedal superficial sin plantar – B	Contaminante diluido al 3% y un volumen de agua de 207,4 litros
2	Humedal subsuperficial plantado – Cp	Contaminante diluido al 3%, un volumen de agua de 207,4 litros, tres capas de grava con diferentes diámetros y <i>T. latifolia</i>
3	Humedal subsuperficial sin plantar – Sp	Contaminante diluido al 3%, un volumen de agua de 207,4 litros y tres capas de grava con diferentes diámetros.

Las repeticiones serán el número de pruebas realizadas, las cuales tendrán los arreglos descritos en la tabla anterior para determinar la remoción de los hidrocarburos totales y diferencia entre las variables fisicoquímicas medidas en cada uno de los humedales.

El modelo experimental obedece a un diseño en bloques el cual se representa con la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = X + \beta_i + \alpha_j + u_{ij} \quad (5)$$

Donde,

Y_{ij} = Observación o respuesta en el i -ésimo bloque para j -ésimo tratamiento.

X = Variable respuesta.

β_i = El efecto del bloque (Muestreos de HTP)

α_j = Factor de Tratamiento (Tipo de humedal)

u_{ij} = Error Experimental

La prueba de hipótesis estadística consistió en:

Tabla 5. Hipótesis nula e hipótesis alterna del proyecto

Factor	H_0	H_1
Sistemas de tratamiento para la remoción de residuos líquidos de combustible	No hay diferencia significativa entre la remoción del humedal plantado, el humedal de flujo subsuperficial y el humedal de flujo superficial sin plantar $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$	Por lo menos un sistema es diferentes a los demás $H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

Los datos obtenidos del muestreo se trataron con estadística descriptiva para determinar la varianza y desviación estándar, se realizó una prueba ANOVA que consiste en el análisis de varianza de tres o más grupos de datos que se quieren comparar entre sí, para determinar si hay o no diferencias en los tratamientos para un nivel de significancia del 5%, si $P \leq 0.05$. Para aplicar esta prueba se requiere la evaluación de los supuestos de ANOVA, estos supuestos son Normalidad de los residuos de observación, la homocedasticidad de la varianza y la independencia de los residuos de observación. En caso tal que se demuestre diferencias significativas entre las varianzas según el ANOVA

entonces se rechaza la hipótesis nula y se realiza la prueba de Tukey que consiste en la validación de pruebas de hipótesis, para hacer una comparación múltiple de los tratamientos y determinar cuál de los tratamientos presenta diferencia significativa. Estas pruebas se realizaron en el software Statgraphics Centurion XVI.

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS EN LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTOS

Los parámetros fisicoquímicos que fueron considerado como objeto de estudio de esta investigación fueron: temperatura, pH y potencial de óxido reducción, porque son los principales factores que influyen en los procesos desarrollados en los diferentes sistemas, obteniendo como resultado la información tabulada en el ANEXO C.

El estudio de estas variables se basó en verificar la variación de su comportamiento en cada uno de los sistemas. Para ello, se utilizó la prueba de ANOVA que evalúa si hay diferencias entre los tratamientos. Para la aplicación de la prueba es necesario verificar que los datos cumplan con las verificaciones de los supuestos del ANOVA, siendo estos: La distribución normal de los términos de error aleatorio con esperanza, la homogeneidad de varianzas y la independencia entre los términos de error aleatorio.

3.1.1 Estudio del comportamiento del pH

El comportamiento de esta variable en los tres montajes tuvo comportamientos diferentes como se observa en la Ilustración 4, inicialmente el Blanco disminuyo cronológicamente partiendo de una valor considerablemente neutro hasta valores extremadamente ácidos. Caso contrario ocurrió con los otros dos sistemas mostrando una leve disminución durante el segundo muestreo, recuperándose en los muestreos siguientes oscilando en valores mínimos de 5 hasta valores de 7 para el sistema plantado, comportándose de manera similar el sistema sin plantar.

Estos valores se presentaron porque la existencia de variación entre los componentes de cada sistema mostro un condicionamiento asociado a la cantidad de componentes que formaban el sistema, por tal razón, el blanco fue el sistema más vulnerable al cambio del pH mientras que el más complejo (el plantado) fue el que presento mayor control de la variable.

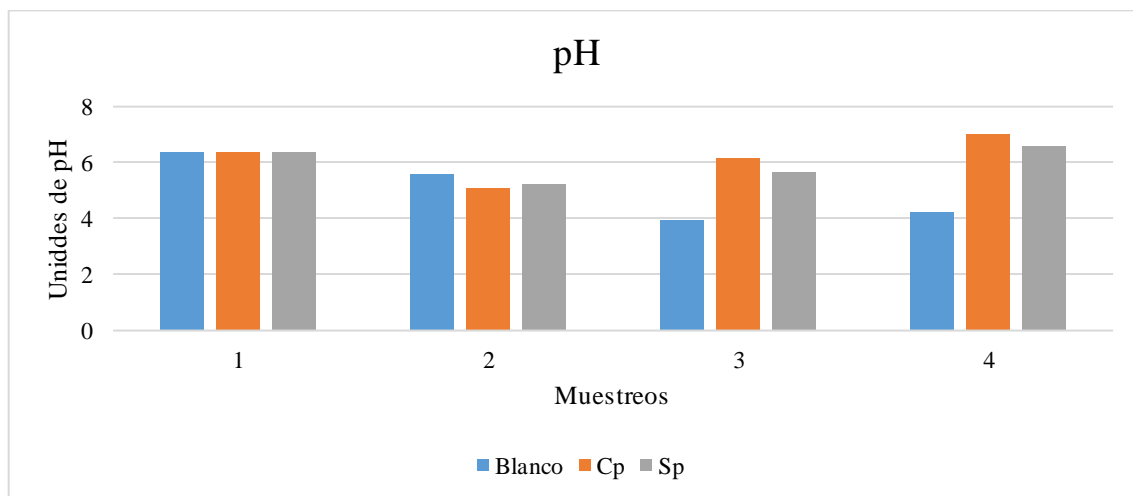


Ilustración 4. Gráfico del pH tomado en campo durante los muestreos. Fuente: Grupo de trabajo 2017

Los resultados obtenidos concluyen que la existencia de un lecho filtrante como la grava y las plantas contribuyen a que el pH del medio tienda a presentar valores neutros. En el estudio se identificó que al iniciar el tratamiento el pH era ácido y al final se encontraron valores muy cercanos a la neutralidad, Mufarrege en 2012 determinó que los tratamientos con humedales artificiales neutralizan los valores de pH.

Para el análisis de la diferencia entre los tratamientos se utilizó ANOVA en el cual se evaluaron las condiciones normalidad en los datos observación, homocedasticidad de las varianzas e independencia (Véase ANEXO DANEXO D).

Luego de haber evaluado las tres condiciones para poder realizar un ANOVA, se obtiene el siguiente análisis. La Tabla 6 resultado del ANOVA que se presenta a continuación, se observa que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, esto indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de pH entre un tratamiento y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 6. Tabla ANOVA para los datos de pH en cada uno de los tratamientos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2,79555	2	1,39778	1,80	0,2206
Intra grupos	7,00428	9	0,778253		
Total (Corr.)	9,79983	11			

3.1.2 Estudio del comportamiento del Potencial de Oxido Reducción

El comportamiento del potencial de óxido reducción en los tres sistemas fue muy variado, mostrando que en el Blanco al no tener intervención biológica o química, no existen motivos por el cual, este parámetros sufra grandes modificaciones, los valores medidos siempre fueron positivos indicando que hubo un medio oxidado durante los 4 muestreos, pero con mayor intensidad al inicio y al finalizar el tratamiento, sin embargo las observaciones indican que la variación de este parámetro no fue muy significativa.

Los sistemas con plantas y sin plantar mostraron un comportamiento variable durante los muestreos como se aprecia en la Ilustración 5, pero con similitudes entre ambos. En el punto de partida, para los 3 tratamientos fue igual, pero en el segundo muestreo mostró una gran variación respecto al Blanco, porque los sistemas plantados y sin plantas se obtuvieron valores negativos y en los siguientes, de nuevo valores positivos, esto podría indicar que en el segundo muestreo hubo un aumento de microorganismos Anaerobios estrictos, y durante la mayoría del proceso hubieron microorganismos Aerobios estrictos, según (Fuentes & Massol-Deyá 2002).

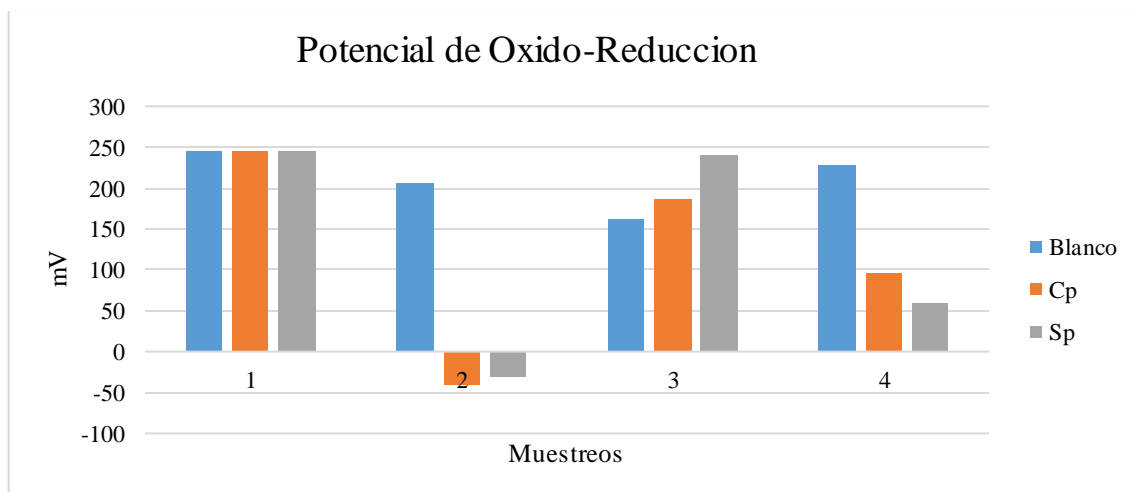


Ilustración 5. Gráfica del potencial de óxido reducción tomados en campo durante los muestreos. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

Luego de haber evaluado las tres condiciones para poder realizar un ANOVA (Véase ANEXO D), se obtiene el siguiente análisis. La Tabla 7 se muestra el resultado del ANOVA, se observa que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, queriendo esto decir que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de potencial de óxido reducción entre un tratamiento y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 7. Tabla ANOVA para los datos de Potencial de Oxido reducción en cada uno de los tratamientos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2,79555	2	1,39778	1,80	0,2206
Intra grupos	7,00428	9	0,778253		
Total (Corr.)	9,79983	11			

3.1.3 Estudio del comportamiento de la Temperatura

El análisis de la variable de temperatura se observa que en todos los tratamientos fue similar, mostrando un aumento en todos los sistemas como se puede ver a continuación en la Ilustración 6, presentando diferencias en los valores más altos en el muestreo 3 por

el Blanco y en el muestreo 4 en el sistema del sistema con plantas. Este aumento se puede asociar tanto a la exposición de los medios a la intemperie, los horarios de toma de muestra y al metabolismo de los microorganismos que se pudo presentar en los medios.

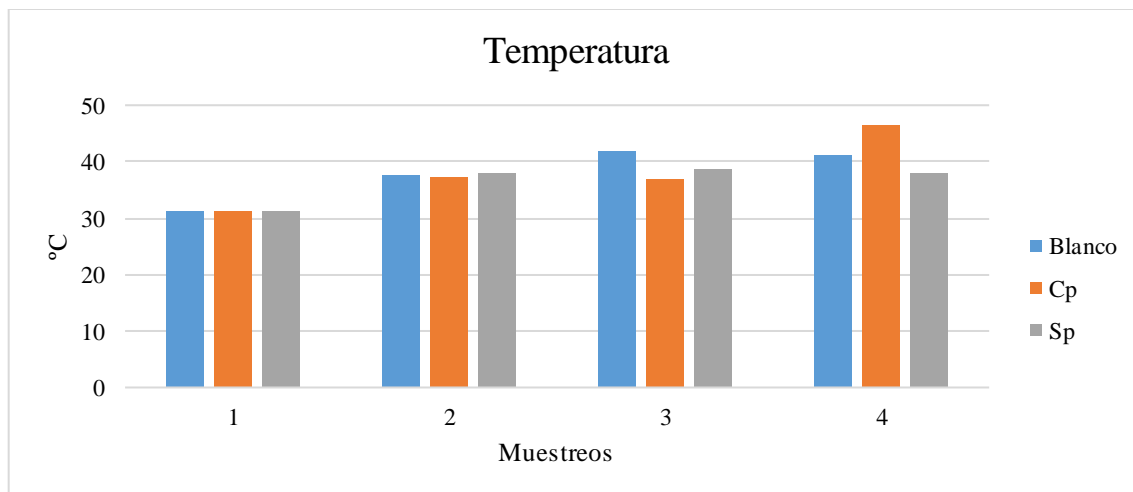


Ilustración 6. Gráfica de la temperatura tomada en campo durante los muestreos. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

Luego de evaluar las tres condiciones para poder realizar un ANOVA (Véase ANEXO D), se obtiene el siguiente análisis. La Tabla 8 resultado del ANOVA que se presenta a continuación, se observa que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, mostrando que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de temperatura entre un tratamiento y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 8. Tabla ANOVA para los datos de Temperatura en cada uno de los tratamientos.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	5,4762	2	2,7381	0,11	0,8949
Intra grupos	219,179	9	24,3532		
Total (Corr.)	224,655	11			

3.2 ANÁLISIS EL CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE LA *T. latifolia* EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO

3.2.1 Porcentaje de masa seca (Biomasa)

Como resultado de la aplicación de la metodología diseñada para analizar el crecimiento del cultivo se obtuvieron los datos que se muestran la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen del muestreo de plantas del sistema de tratamiento

ANÁLISIS DEL CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE <i>T. latifolia</i> EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO						
DDT	Peso Húmedo	Peso seco (Planta)	Porcentaje de humedad	Porcentaje de peso seco	Peso Seco (Raíz)	Peso Seco (Hoja)
1	120,8	73,842	38,9%	61%	65,361	8,481
15	251,8	151,797	39,7%	60%	140,085	11,7126
43	142,61	80,102	43,8%	56%	68,085	12,017
71	86,7597	26,8136	69,1%	31%	15,9136	10,9

El peso húmedo es la masa que tuvo la planta recién se extrajo del medio, y el peso seco es la masa que se midió luego de haber sometido a las plantas a un proceso de deshidratación junto a sus raíces, pesándolas individualmente.

Se identificó que el porcentaje de humedad que había en las muestras frescas de las plantas del sistema de tratamiento durante los primeros 3 muestreos, correspondió a un 40% aproximadamente mientras que el último fue del 70%. Indicando que durante los primeros 3 muestreos hubo una menor absorción por el cultivo, concentrándose aproximadamente el 90% de la masa total en las raíces.

Como se observa en la Ilustración 7 el muestreo donde hubo un mayor porcentaje de masa seca fue el primero, disminuyendo progresivamente hasta el final del tratamiento, mostrando en la última etapa del tratamiento la disminución fue mayor.

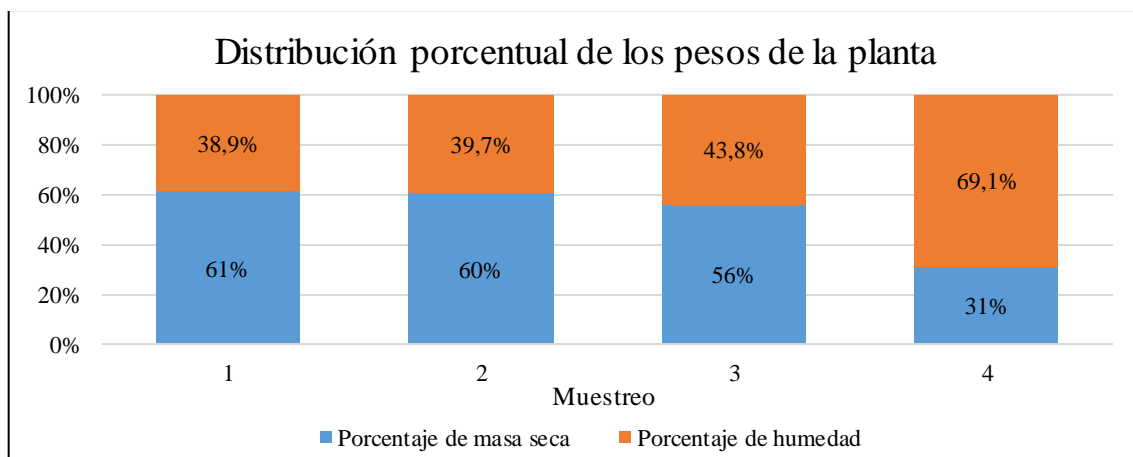


Ilustración 7. Grafica de variación multitemporal del porcentaje de masa húmeda y seca medidas en laboratorio de las muestras de los sistemas de tratamiento. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

Las variables fisicoquímicas son factores que influyen directamente el crecimiento de las plantas. El pH se comportó de manera inversa al crecimiento de la planta. Como se observa en la Ilustración 8 que en su mayoría el pH fue ácido y que en el muestreo 2 donde hubo mayor porcentaje de masa seca de las plantas fue donde mayor acidez se presentó y a medida que el pH se neutralizó la masa seca de las plantas disminuyó. Lo que implica que en estas raíces podrían estar exudando protones de hidrogeno, según lo explica (Mentaberry 2011) lo que genera acidez en el medio por el crecimiento del sistema radicular de las plantas

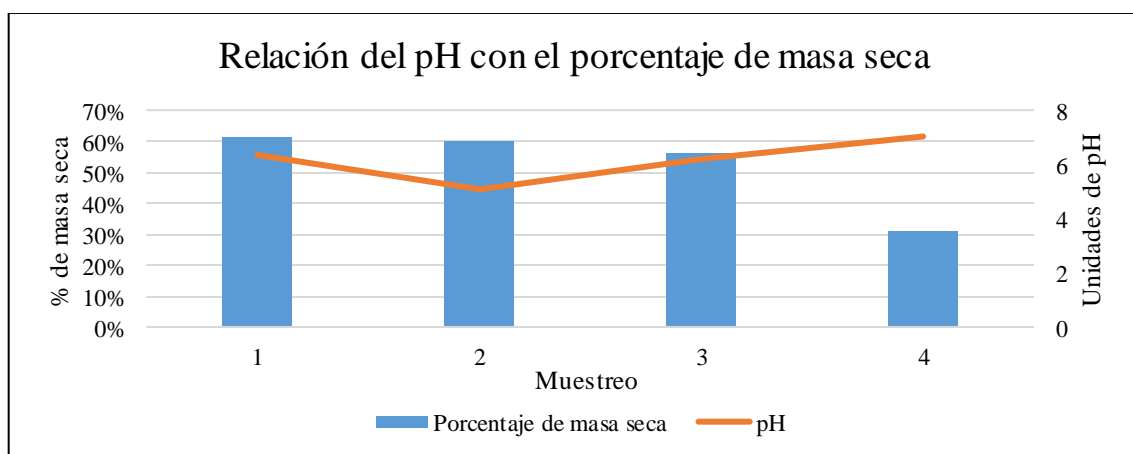


Ilustración 8. Gráfico de relación entre el pH y el porcentaje de masa seca del cultivo. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

Según (WieBner, et al. 2006) la especie vegetal *T. latifolia* presenta una generación de oxígeno en sus raíces de $1,41 \text{ mg/h} * \text{planta}$ lo cual influencia el potencial de óxido reducción en el medio, con un comportamiento inverso al crecimiento de las raíces y de toda la planta en general, como se puede identificar en la Ilustración 9, sin embargo durante la última etapa del tratamiento la actividad microbologica pudo influenciar en el cambio de la relación entre ambas variables.

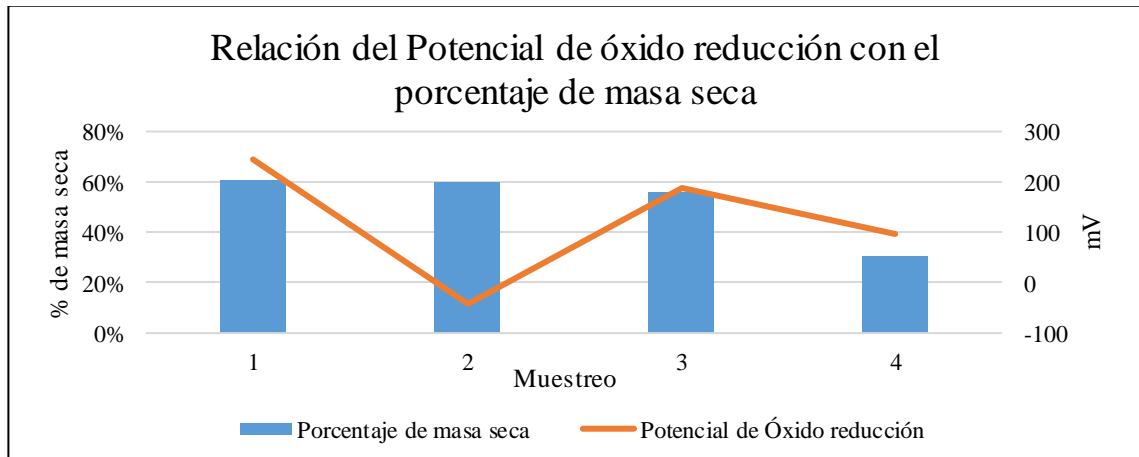


Ilustración 9. Gráfico de relación entre el potencial de óxido reducción y el porcentaje de masa seca del cultivo. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

La relación que existe entre la temperatura y el desarrollo de la planta no fue muy significativa, durante el tratamiento, pero en la última etapa del tratamiento puede que las altas temperaturas hayan afectado el crecimiento del cultivo como se observa en la Ilustración 10, sin embargo se debe tener en cuenta que las temperaturas no fueron extremas pero pudieron afectar de forma indirecta el crecimiento de la planta por ser un medio artificial que no cuenta con autorregulación térmica.

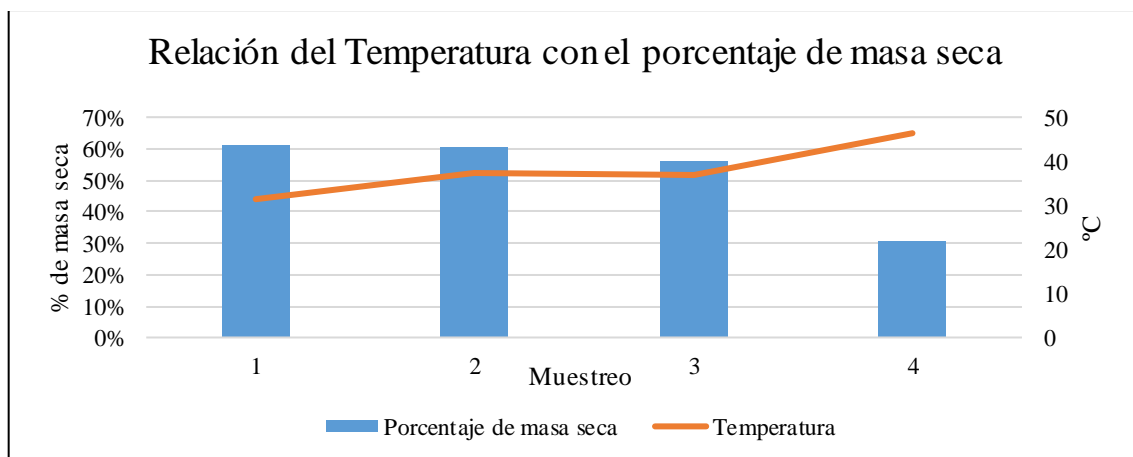


Ilustración 10. Gráfico de relación entre la temperatura y el porcentaje de masa seca del cultivo. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

3.2.2 Índices de crecimiento de la fisiología vegetal de *T. latifolia*

Los índices que se tuvieron en cuenta para analizar el desarrollo fisiológico de la especie vegetal estudiada en su entorno natural y en el sistema de tratamiento fueron: Tasa de Crecimiento Relativo (TCR), y la Tasa de Crecimiento Absoluto (TCA). Los resultados del cálculo de los índices se encuentran en el ANEXO FANEXO F.

La tasa de crecimiento relativo es la velocidad de crecimiento de una parte de la planta con respecto a la planta en general, se calculó de utilizando la ecuación 1, expresada en el aumento de masa de la planta durante un periodo. Al estudiar los resultados presentados en la Ilustración 11 se observa que durante el primer periodo fue mayor la velocidad de crecimiento, sin embargo durante el segundo y tercer periodo la tasa de crecimiento relativa de las plantas seleccionadas fue negativo. Esto significa que al inicio del tratamiento las plantas crecieron, luego de este punto las condiciones tan diferentes a las naturales, aumentaron la marchitez de las hojas y en consecuencia disminuyó el peso seco de las plantas y las raíces, obteniendo así tasas con valores negativos.

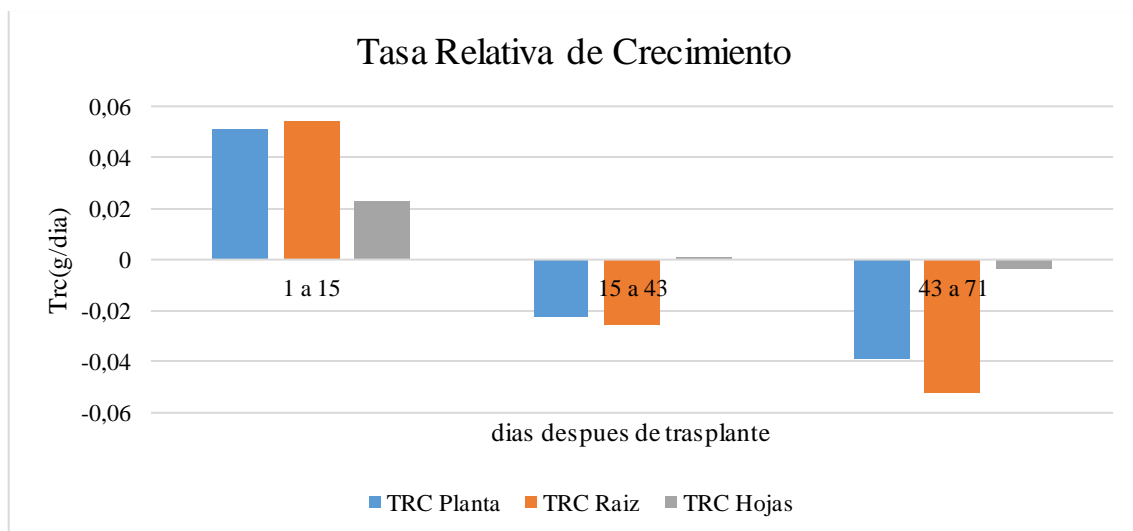


Ilustración 11. Grafica de la variación de la Tasa de crecimiento relativo durante el tiempo de estudio. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

La tasa absoluta de crecimiento es la variación del peso seco de las plantas de un cultivo en el tiempo, se calculó empleando la ecuación # 3, al igual que en la tasa relativa de crecimiento, el resultado del análisis fue similar, identificando una clara disminución durante todo el proceso en las plantas del sistema de tratamiento. La explicación de este comportamiento que llegó a ser negativo en los dos últimos periodos, es generado por la alteración que causa la inclusión de un contaminante en el medio, haciendo que las plantas luego de un corto tiempo de exposición decrezcan su peso en consecuencia generando unas tasas de crecimiento negativas, como se observa en la Ilustración 12. Entre los últimos 2 periodos se observa un aumento en la tasa de crecimiento mostrando un menor decrecimiento, lo que se puede explicar por una posible asimilación al contaminante en esta etapa del tratamiento.

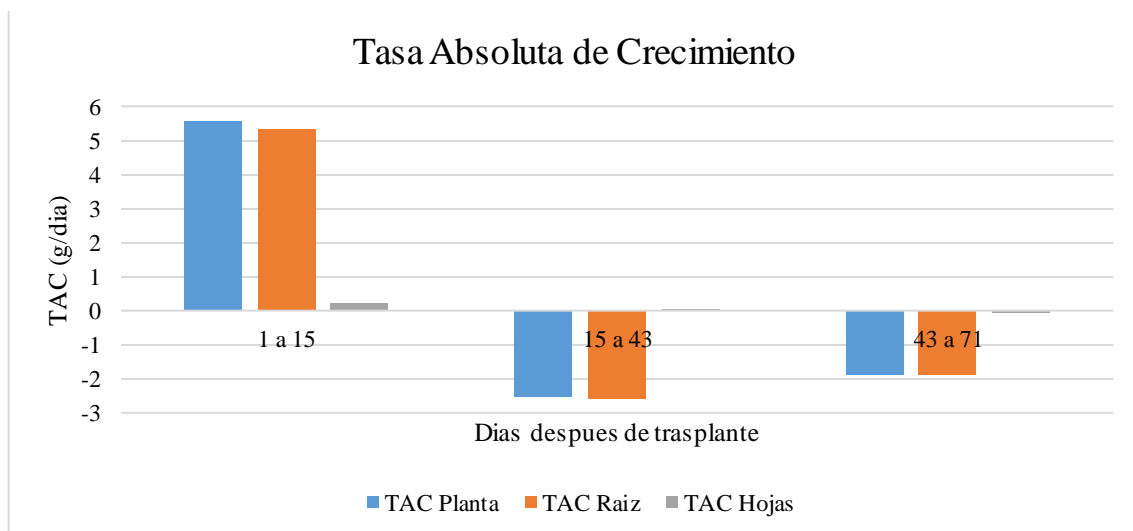


Ilustración 12. Grafica de la variación de la Tasa absoluta de crecimiento durante el tiempo de estudio. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

3.3 EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES.

El rendimiento de los sistemas de tratamiento está expresado en función de la cantidad de contaminante que es capaz de degradar, en este estudio se trató como contaminante principal los hidrocarburos totales de petróleo. En el ANEXO I donde están tabuladas las concentraciones de HT presentes en cada uno de los sistemas por muestreo.

La Ilustración 13 muestra de los resultados obtenidos del laboratorio, tabulados en el ANEXO HANEXO H. Identificando que hubo disminución significativa entre el primer muestreo y el segundo, mostrando que la mayor eficiencia de remoción se presentó durante los primeros 15 días y durante los siguientes muestreos disminuyó la concentración pero con menor eficiencia.

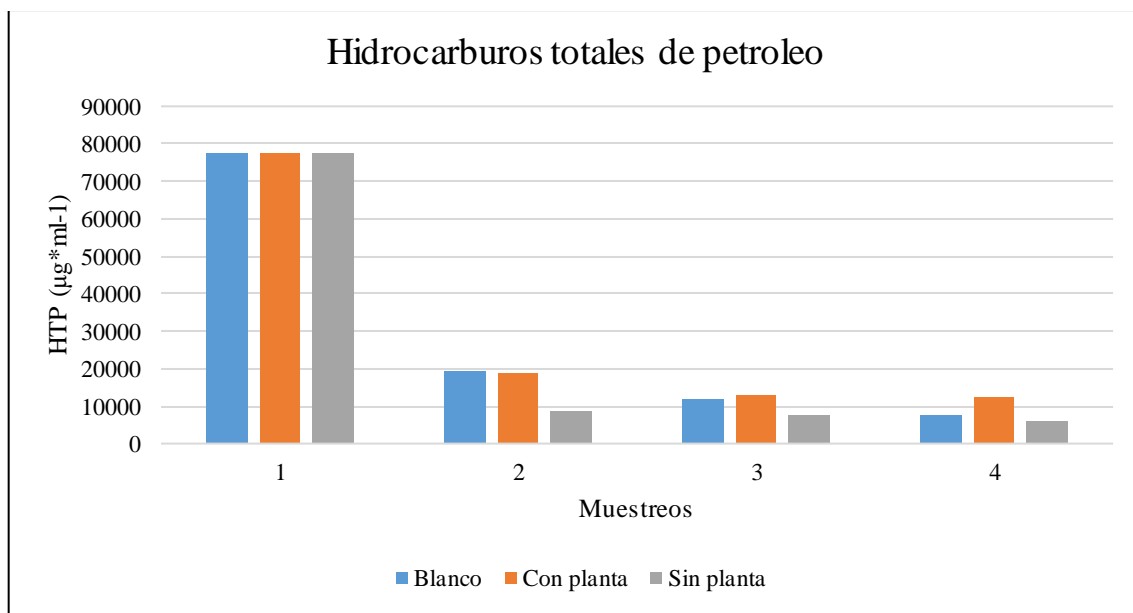


Ilustración 13. Gráfica de los resultados de hidrocarburos totales de petróleo. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

Con los resultados obtenidos del laboratorio se realizó el cálculo del porcentaje de remoción en cada uno de los sistemas de tratamiento, empleando la ecuación # 3 en la cual se evaluó con respecto a la concentración de entrada y la concentración de salida de HTP de cada uno de los sistemas tomando a las concentraciones medidas en el primer y último respectivamente, obteniendo remociones mayores del 80% del contaminante.

Con las remociones totales obtenidas se calculó el volumen de agua descontaminado por cada uno de los sistemas. Siendo el sistema Sin planta el que mayor eficiencia tuvo para la remoción de hidrocarburos totales mientras que el sistema Con planta presentó la menor eficiencia de remoción como se observa en la Tabla 10.

Tabla 10. Porcentaje de remoción de HTP para cada uno de los sistemas entre los muestreos.

REMOCIÓN (%)	Blanco	Con planta	Sin planta
	90,19%	83,77%	91,97%
Volumen Total			207,375
Volumen removido	187,04	173,72	190,73

Otro componente importante para el estudio de las concentraciones obtenidas de los sistemas de tratamiento es la correlación que pueda guardar éste con las variables fisicoquímicas. Luego de estudiar la correlación entre las variables, identificamos que únicamente hay una correlación significativa entre los humedales Sin plantas y Con plantas, con respecto al potencial de óxido reducción como se observa en los siguientes gráficos. Los demás análisis de correlación estudiados se encuentran en el ANEXO J pero por su poca correlación no fueron tenidos en cuenta para éste análisis.

Las ilustraciones 14 y 15 explican la relación existente entre potencial de óxido-reducción y las concentraciones de HTP en los sistemas de tratamiento Con plantas y Sin plantas; teniendo en cuenta que el potencial de óxido-reducción se comportó de manera similar durante los muestreos, se puede decir que a valores altos de óxido reducción se podrían generar microorganismos que transforman las cadenas de Hidrocarburos, siendo estos microorganismos aerobios estrictos (Fuentes & Massol-Deyá 2002).

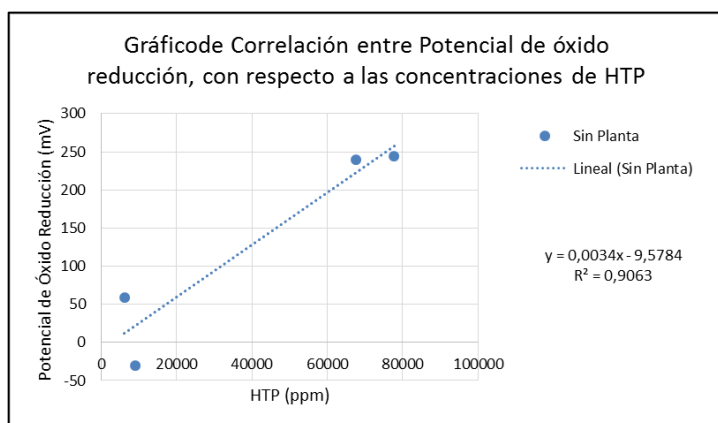


Ilustración 14. Gráfico de correlación entre el potencial de óxido reducción con respecto a las concentraciones de HTP en el sistema sin plantar. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

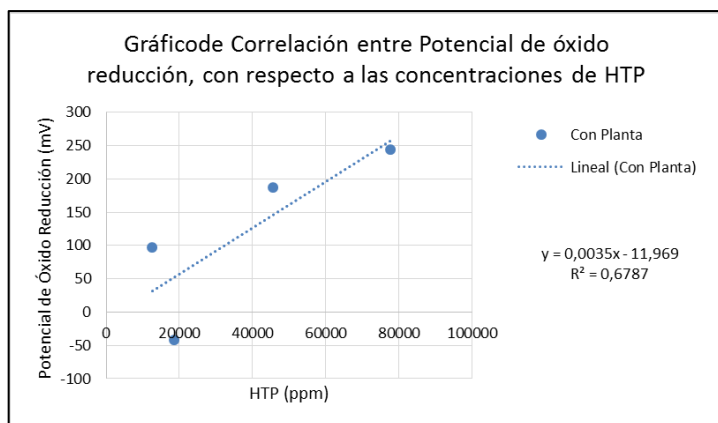


Ilustración 15. Gráfico de correlación entre el potencial de óxido reducción con respecto a las concentraciones de HTP en el sistema plantado. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

3.3.1 Análisis de varianza entre los sistemas de tratamiento con respecto a la concentración de Hidrocarburos totales de petróleo

Para realizar la prueba de análisis de varianza del diseño se debe realizar una verificación estadística de los supuestos para esta prueba.

- Análisis de Normalidad de los residuos de Observación**

En la Tabla 11 se muestran los valores de residuos de observación, además se muestran medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. Los valores de interés para este análisis son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales se utilizan para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Como el rango de estos valores estadísticos está entre -2 a +2 indican que los datos provienen de una distribución normal.

Tabla 11. Resumen Estadístico para los residuos de observación

Recuento	12
Promedio	-0,000666667
Mediana	495,396
Desviación Estándar	6792,59
Coeficiente de Variación	-1,01889E9%
Mínimo	-15049,4
Máximo	9492,3
Rango	24541,7
Sesgo Estandarizado	-1,1133
Curtosis Estandarizada	0,563044

La Ilustración 16 muestra la gráfica que muestra como los residuos se distribuyen normalmente con respecto a la línea de referencia, estando sobre ella o muy cerca.

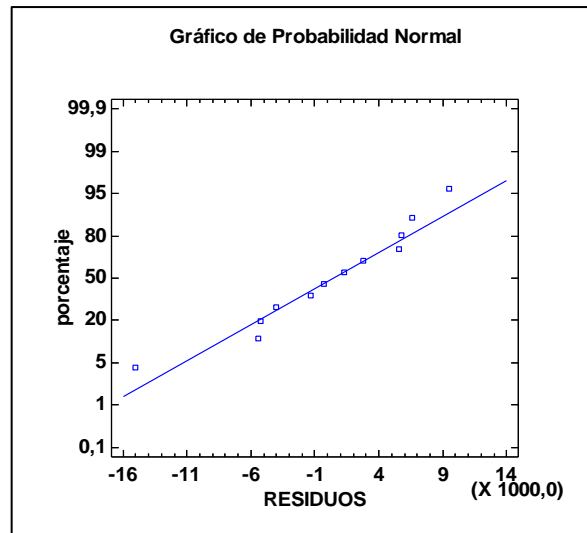


Ilustración 16. Gráfico de normalidad de los residuos de observación. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

- **Análisis de homocedasticidad (Homogeneidad de varianzas)**

El gráfico de dispersión de residuos vs predichos que se muestra en la Ilustración 17 presenta una nube de puntos sin patrón alguno. Lo cual manifiesta una homogeneidad de varianzas.

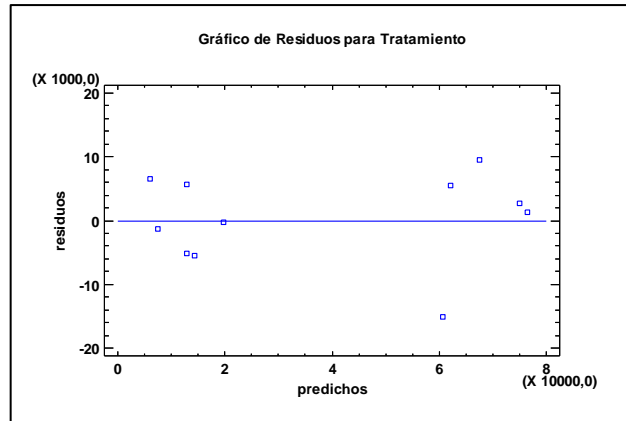


Ilustración 17. Gráfico de los residuos de observación vs los predichos.

Fuente: Grupo de trabajo, 2017

- **Análisis de Independencia**

Como se puede observar en la Ilustración 18 no existe un patrón para los datos de los residuos de observación lo cual significa que los residuos presentan una independencia en su comportamiento.

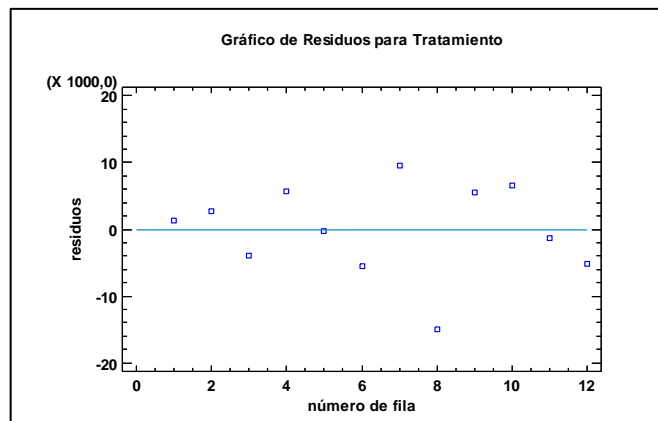


Ilustración 18. Gráfico de independencia de los residuos. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

Luego de realizar la verificación estadística de los supuestos, se comprueba que si se puede realizar la prueba de análisis de varianza para este modelo.

En la Tabla 12 se observa el resultado del ANOVA de los bloques y los sistemas de tratamiento. Como el p-valor asociado al ANOVA aplicado a los bloques es menor que 0,05 se comprueba que existe diferencia significativa dentro de los bloques y entre los

bloques, siendo este la última necesaria para la verificación del método, arrojando un 95,0% de nivel de confianza.

Tabla 12. Análisis de varianza de la concentración de HTP- Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tratamientos	1,01462E8	2	5,07311E7	0,60	0,5788
B:BLOQUE	1,05855E10	3	3,52849E9	41,71	0,0002
RESIDUOS	5,07531E8	6	8,45885E7		
TOTAL (CORREGIDO)	1,11945E10	11			

En la Ilustración 19 se puede observar que no existe una diferencia significativa entre las varianzas de los tratamientos pero si entre los bloques, corroborando lo que el resultado de un P-valor mayor a 0,05 indica que no hay diferencias significativas entre los sistemas de tratamiento.

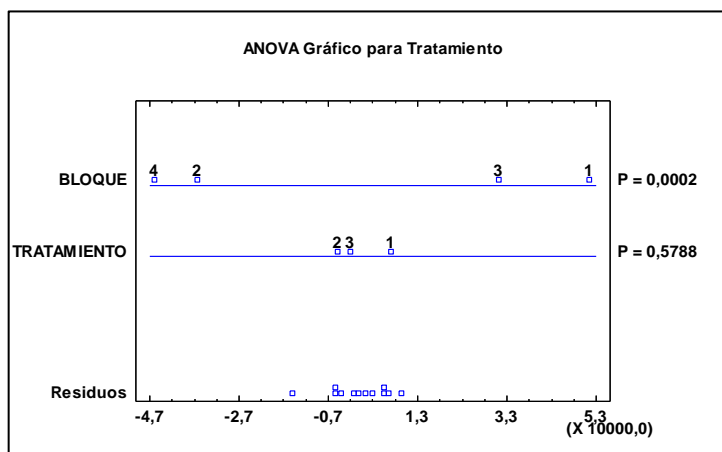


Ilustración 19. Gráfico de ANOVA aplicado a los bloques y los sistemas de tratamiento. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

3.4 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN COSTO-EFECTIVIDAD DE LA REMOCIÓN DE RESIDUOS DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Para el análisis de coste-efectividad se relacionaron los costos de operación y mantenimiento de cada uno de los sistemas de tratamiento con respecto a su efectividad para la remoción de hidrocarburos totales, aplicando la ecuación 4 de la metodología con la información consignada en el ANEXO L, determinando el valor en COP por tratamiento, para la remoción de $1 \mu g * ml^{-1}$ de HTP.

Los costos en los que se incurrió en este estudio fueron en la construcción del sistema, siendo estos el humedal de fibra de vidrio, la tubería, el sustrato y el pago a los obreros que realizaron la adecuación del lugar; el mantenimiento y monitoreo, que fueron la siembra de plantas (en el humedal plantado), la realización de análisis de laboratorio, la toma de parámetros en campo y limpieza de basuras que llegaron al sistema.

Tabla 13. Análisis del coste-efectividad de los sistemas de tratamiento

Tratamiento	Coste	Efectividad	CE
Con Plantas (Cp)	\$ 2.242.900	65107,64	\$ 34
Sin planta (Sp)	\$ 2.142.900	71482,72	\$ 30
Blanco	\$ 1.872.900	70099,1	\$ 27

En el plano del coste-efectividad de la Ilustración 20 se observan los tres sistemas de tratamiento en diferentes posiciones, el sistema plantado se ubica en la parte superior e izquierda del grafico indicando que se presentan mayor inversión y una menor efectividad de remoción de HT, este sistema a pesar de tener una menor remoción de la principal variable de estudio, pero fue quien mayor control realizó a la variable pH que es un factor primordial en la calidad del agua, llegándose a medir un pH con condiciones similares a las de un ambiente natural.

Se observa que el sistema que presento una menor relación CE fue el blanco debido al bajo costo de inversión que este representa y su notable rendimiento con respecto a la

remoción de HTP no significa que fue el mejor sistema teniendo en cuenta el poco control que realizó a las variables fisicoquímicas, específicamente al pH del que se identificaron valores extremadamente ácidos.

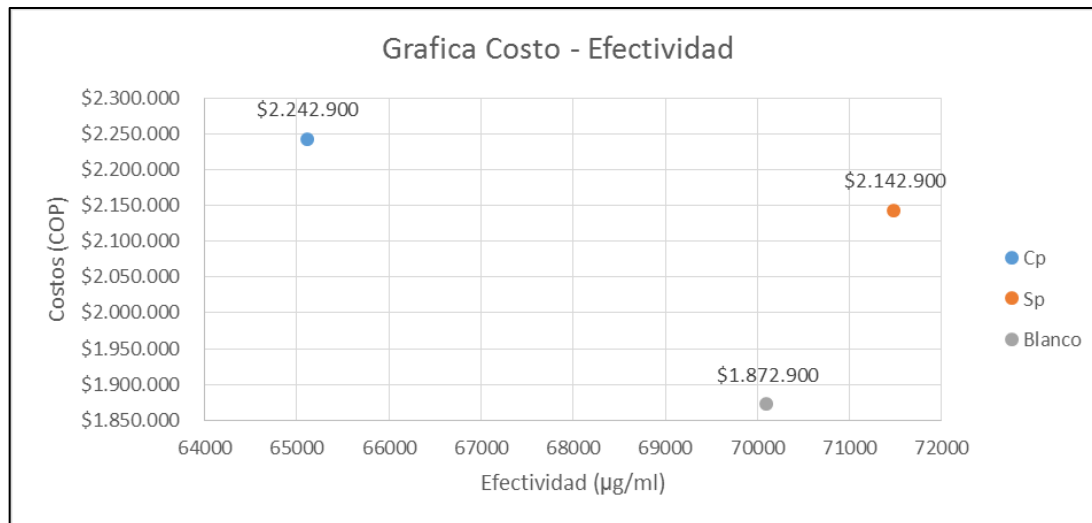


Ilustración 20. Plano de coste-efectividad de los sistemas de tratamiento. Fuente: Grupo de trabajo, 2017

El sistema sin plantas se localiza en la parte superior derecha del gráfico indicando una mayor efectividad a unos costos considerables, siendo este quien mayor efectividad tuvo, sin ser el de mayor inversión, además realizando un notable control a las variables fisicoquímicas. Teniendo en cuenta lo anterior, se determina que el excedente en costos con respecto al blanco representó una mayor eficiencia con los demás parámetros medidos durante el estudio, siendo este así el sistema sin plantar, el tratamiento con un análisis coste-efectividad más favorable desde la óptica global del estudio.

4 CONCLUSIONES

- Las variables fisicoquímicas estudiadas presentaron una correlación con el contaminante de estudio únicamente en el caso del potencial de óxido reducción, pero se hizo evidente que la existencia de un sustrato como medio filtrante y la intervención de una especie vegetal para el control del pH.
- Del análisis de la especie vegetal plantada se identificó que estas se ven afectadas directamente por el contaminante, las altas temperaturas registradas y la intemperización, fueron factores determinantes en el desarrollo fisiológico de las plantas.
- En el cálculo de la eficiencia de remoción de los sistemas de tratamiento se demostró que no existe una diferencia significativa con respecto a la existencia o no de especies vegetales, pero con relación a las demás variables fisicoquímicas si es un factor a tener en cuenta.
- Desde el punto de vista económico el sistema más efectivo es el sistema sin plantar por ser el que presento una mayor eficiencia de remoción a un costo considerable y controlando aceptablemente las variables fisicoquímicas.

5 RECOMENDACIONES

- Se debe considerar realizar esta clase de estudios a escala piloto en ambientes controlados, donde se discriminen variables meteorológicas como la lluvia y la radiación solar.
- Diseñar un cronograma de muestreo con periodos más cortos, para disminuir el error en los análisis, y tener más datos con los cuales utilizar herramientas estadísticas más discriminatorias.
- Realizar análisis microbiológicos en las raíces de las plantas, al sustrato y al mismo medio, que ayuden a sustentar los resultados obtenidos en este estudio.
- Desarrollar este estudio en escala real podría considerarse un sistema de tratamiento eficiente para la remoción de este contaminante en complejos industriales o en empresas especializadas en el manejo de combustibles.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Bianco, S., Pitelli, R. A. & Pitelli, A. M., 2003. Estimativa da área foliar de *Typha latifolia* usando dimensões lineares do limbo foliar. *Planta daninha*, 21(2), pp. 257-261.
- Birch, G., Matthai, C. & Fazeli, M., 2006. Eficiencia de un humedal construido en la eliminacion de contaminantes de aguas pluviales. *Efficiency of a retention/detention basin to remove contaminants from urban stormwater*, III(2), pp. 69-77.
- Bonilla Barbosa, J. R. & Santamaria Araúz, B., 2014. *Plantas acuáticas exóticas y trasladadas invasoras*. Primera ed. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Burgos Arroyo, P. A., 2014. *Tratamiento de efluentes de baño de ganado contaminado con cipermetrina, en humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal a escala piloto*, Montería: Universidad de Córdoba.
- Capacho Gutierrez, A. & Uribe Jaimés, E. J., 2005. *Evaluación, Diagnostico y Optimización de los procesos de la planta de tratamiento de agua potable de Floridablanca*, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Castellanos, 2009. *Análisi de crecimiento de 2 accesiones de ají amazonico Capsicum sp.* Florencia: Universidad Nacional de Colombia.
- Corseuil, H. & Moreno, F., 2000. Phytoremediation potential of willow trees for aquifers contaminated with ethanol-blended Gasoline. *Water Research*, XXXV(12), pp. 3013-3017.
- Cubillos Vargas, J. A., 2011. *Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Cuevas Garcia, R., 2009. *Conceptos de reactores quimicos*, Mexico: UNAM.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. F. & Andrade, M., 2010. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba - Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.

Euliss, K. y otros, 2008. Greenhouse and field assessment of phytoremediation for petroleum contaminants in a riparian zone.. *ELSEVIER*, IC(2008), p. 1961–1971.

Fountoulakis, M., Terzakis, S., Kalogerakis, N. & Manios, T., 2009. Removal polycyclic aromatic hydrocarbons in linear alkybencenos sulfonates from domestic wastewater in pilot constructed wetlands and gravel filter. *Ecological engineering*, XXXV(1), pp. 1702-1709.

Frick, C., Farrell, R. & Germida, J., 1999. *Assessment of Phytoremediation as an In-situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites Prepared*, Canada: Department of Soil Science University of Saskatchewan Saskatoon.

Garcia Serrano, J. & Corzo Hernandez, A., 2008. Guia Practica de diseño, construccion y explotacion de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. En: Catalunya: Departamento de ingenieria hidraulica maritima y ambiental de la Universidad politecnica de Catalunya.

Gessner, T., Kadlec, R. & Reaves, R., 2005. Wetland remediation of cyanide and hydrocarbons. *Ecologic engineering*, XXV(1), pp. 457-469.

Intertek, 2012. *Análisis de Agua Contaminada con Hidrocarburos*. [En línea] Available at: <http://www.intertek.es/medioambiente/analisis-agua-contaminada-con-hidrocarburos/>
[Último acceso: 13 Febrero 2015].

Marínez Florez, G. & Robles González, J., 2011. *Metodos y diseños estadísticos de experimentos*. Primera ed. Montería: Universidad de Córdoba.

Melgarejo, L. M. y otros, 2010. *Experimentos en fisiología vegetal*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Mendez Natera, J. R., 2002. Relación entre el peso seco total y los caracteres vegetativo s y la modulacion de plantas de manì *Arachis hypogaea*. *UDO Agricola*, II(1), pp. 46-53.

Menone, M. L., Pérez , D. J., Lukaszewicz, G. & Camardo, E. L., 2015. Identification of freshwater hydrophytes for genotoxicity assessment of aquatic pollutants. *Journal of Basic & Applied Gnenetics* , 26(2), pp. 9-17.

- Mentaberry, A., 2011. *Cuso de Agrobiotecnologia*. Primera ed. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. *Decreto 3930*. Bogotá: MinAmbiente.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015. *Decreto Único Ambiental 1074*. Bogotá: MinAmbiente.
- Mogollon Gelvez, M., 2005. *Caracterización fisicoquímica de los humedales artificiales Universidad de Pamplona, Norte de Santander*, Pamplona: Universidad Industrial de Santander.
- Moral Luque, S., 2002. *Impacto ambiental global de las estaciones de servicio y su singularidad por lo que respecta al vertido accidental de aguas hidrocarburadas*, Barcelona: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Mufarrege, M. d. l. M., 2012. *Tolerancia y eficiencia de la Typha domingensis Pers. en la retención de metales y nutrientes de efluentes industriales*, Santa Fe: Universidad Nacional del litoral.
- Ñustez Cuartas, D. C., 2012. *Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales de petroleo presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Omari, K., Revitt, M., Shutes, B. & Garelick, H., 2003. Hydrocarbon removal in an experimental gavel bed constructed wetland. *Water science and technology*, XLVIII(5), pp. 275-281.
- Peng , S., Zhou, Q., Cai, Z. & Zhang, Z., 2009. Phytoremediation of petroleum contaminated soils by *Mirabilis Jalapa* L. in a greenhouse plot experiment.. *ELSEVIER*, CLXVIII(2009), p. 1490–1496.
- Prieto, L. y otros, 2004. Análisis coste-efectividad en la evaluación económica de intervenciones sanitarias. *ELSERVIER*, 122(13), p. 6.

Pulgarin , M. D. P., 2012. *Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de sedimentos contaminados con Hidrocarburos procedentes de las estaciones de servicio en Risaralda*, Pererira : Universidad Tecnologica de Pereira .

Rincon Guerrero, N., Olarte Quintero, M. A. & Perez Naranjo, J. C., 2012. Leaf area measure in photograph taken with a Webcam, Cell Phone or a semi professional camera. *Facultad Nacional de Agronomia*.

Romero Mares, I. P., 2013. *Metodos de Diseñono y Análisis de Experimentos*. Primera ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Romero, J. A., 2004. *Purificación del agua*. Bogotá: Escuela de Ingenierias.

Salmon, C. y otros, 1998. Artifical wetland performance in the purification efficiency of hydrocarbons wastewater.. *Water air and soil pollution*, I(104), pp. 313-329.

Setti, K., 2014. *Manual de construcción: Humedales construidos para el tratamiento de aguas negras*, Santa Barbara, California: Bren School Enviromental Science and Management.

Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, 2002. *Manual de Laboratorios Ecología Microbiana*. Primera ed. Mayagüez: Universidad de Puerto Rico.

Vasquez Delgado, Z., 2005. *Analisis, diseño y construccion de reactores a escala para desinfeccion de agua potable con radiacion UV*, Cholula, Puebla: Universidad de las Amercias Puebla.

Velasco Garzón, F. & Espinosa Escarria, C. A., 2010. *Evaluacion de la fitorremediacion en terminos de remocion de carga organica, tratando aguas residuales contaminadas con hidrocarburos*, Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira.

Velasco, F. & Espinosa, C., 2010. Evaluacion de la fitorremediación en términos de remoción de carga organica, tratando aguas residuales contaminadas con hidrocarburos . En: Pereira, Colombia: Universidad Tecnologica de Pereira.

Volke Sepúlveda, T. L. & Velasco Trejo, J. A., 2003. *Biodegradación de hidrocarburos del petróleo en suelos intemperizados mediante composteo*, Mexico : Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental.

WieBner, A., Kuschik, P., Käsner, M. & Stottmeister, U., 2006. Abilities of Helophyte Species to Release Oxygen into Rhizospheres with Varying Redox Conditions in Laboratory-Scale Hydroponic Systems. *International Journal Of Phytoremediation*, IV(1), pp. 1 - 15.

Wood, A., 1995. Constructed Wetlands in Water Pollution Control: Fundamentals to Their Understanding. *Pergamon*, 32(3), pp. 21-229.

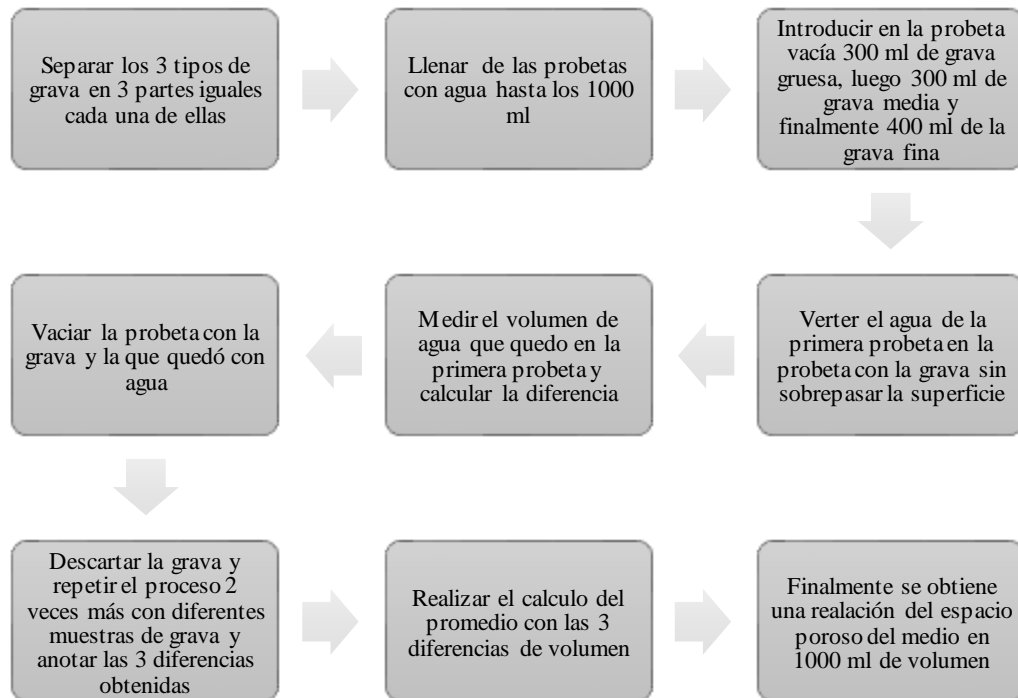
7 ANEXOS

ANEXO A. Prueba de porosidad para determinación del volumen teórico en los sistemas de tratamiento.

MATERIALES.

- Dos probetas plásticas de 1000 ml
- 900 ml de grava gruesa
- 900 ml de grava mediana
- 1200 ml de grava fina
- Agua

PROCEDIMIENTO



RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron de la prueba de porosidad realizada se encuentran tabulados a continuación.

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
ΔV	395 ml	400 ml	485 ml	395 ml

Resultados de la prueba de porosidad realizado con la estratificación del sustrato utilizado en los humedales

De esta tabla se obtuvo que luego de realizar las 3 pruebas, en promedio el volumen que corresponde al espacio poroso de un medio que corresponda una proporción de 30% grava gruesa, 30% grava media y 40% grava fina como corresponde a la escala real el volumen de los humedales, es de 395 ml si el 100% del volumen corresponde a 1000 ml. Pero para cualquier caso donde se utilice la misma proporción de grava se hace el siguiente cálculo:

$$\%Porosidad\ del\ medio = \frac{395\ ml * 100\%}{1000\ ml} = 39,5\ \%$$

$$\%Porosidad\ del\ medio = 39,5\ \%$$

Para nuestros humedales se tiene que las dimensiones son de 70 cm de alto por 50 cm de ancho y 150 cm de largo obteniendo un volumen total de 525 litros. Para conocer el volumen de agua que hay en los poros del medio se multiplica el porcentaje de porosidad calculado anteriormente con el volumen total del humedal.

$$V_{agua\ en\ humedal} = \% Porosidad\ del\ medio * Volumen\ total$$

$$V_{agua\ en\ humedal} = 39,5\ \% * 525\ L$$

$$V_{agua\ en\ humedal} = 207,375\ L$$

En conclusión se obtuvo que el volumen de agua teórico que hay en los humedales con grava es de 207,375 Litros.

ANEXO B. Formato de recolección de datos en campo y en laboratorio

Formato de Resultados de análisis de muestra					Montaje:	Blanco	
Hora	Muestreo	Parámetros analizados en laboratorio					
		pH Muestra	Potencial de Óxido Reducción	Temperatura (°C)	Concentración de HCT (ppm)	% Remoción de HCT	
			(mV)			Rango	(%)
9:00 AM	1	6,37	244,67	31,392	77720,56	1 a 2	75,01%
9:00 AM	2	5,61	205,75	37,68	19421,08	2 a 3	38,48%
9:00 AM	3	3,97	162,25	41,86	11947,68	3 a 4	36,21%
9:00 AM	4	4,27	227,95	41,03	7621,46	1 a 4	90,19%

Formato de Resultados de análisis de muestra					Montaje:	Sin Planta Sp	
Hora	Muestreo	Parámetros analizados en laboratorio					
		pH Muestra	Potencial de Óxido Reducción	Temperatura (°C)	Concentración de HCT (ppm)	% Remoción de HCT	
			(mV)			Rango	(%)
9:00 AM	1	6,37	244,67	31,392	77720,56	1 a 2	88,49%
9:00 AM	2	5,21	-29,892	37,957	8949,44	2 a 3	12,76%
9:00 AM	3	5,68	240,16	38,852	7807,71	3 a 4	20,11%
9:00 AM	4	6,59	58,59	38,117	6237,84	1 a 4	91,97%

Formato de Resultados de análisis de muestra					Montaje:	Con Planta Cp	
Hora	Muestreo	Parámetros analizados en laboratorio					
		pH Muestra	Potencial de Óxido Reducción	Temperatura (°C)	Concentración de HCT	% Remoción de HCT	
			(mV)		(ppm)	Rango	(%)
9:00 AM	1	6,37	244,67	31,392	77720,56	1 a 2	76,06%
9:00 AM	2	5,08	-42,01	37,46	18608,88	2 a 3	29,21%
9:00 AM	3	6,18	187,28	36,926	13172,88	3 a 4	4,25%
9:00 AM	4	7,03	96,99	46,364	12612,92	1 a 4	83,77%

ANEXO C. Resultados de análisis de variables fisicoquímicas tomadas en campo.

pH			
Muestreo	Blanco	Cp	Sp
1	6,37	6,37	6,37
2	5,61	5,08	5,21
3	3,97	6,18	5,68
4	4,27	7,03	6,59
Potencial de Oxido Reducción (mV)			
Muestreo	Blanco	Cp	Sp
1	244,67	244,67	244,67
2	205,75	-42,01	-29,89
3	162,25	187,28	240,16
4	227,95	96,99	58,59
Temperatura(°C)			
Muestreo	Blanco	Cp	Sp
1	31,392	31,392	31,392
2	37,68	37,46	37,96
3	41,86	36,93	38,85
4	41,03	46,36	38,12

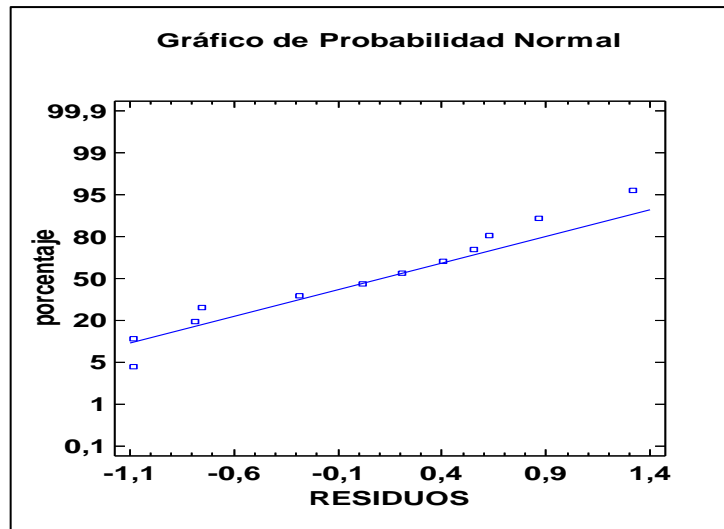
ANEXO D. Verificación estadística de los supuestos para la aplicación de la prueba ANOVA a los parámetros fisicoquímicos.

Análisis de Normalidad

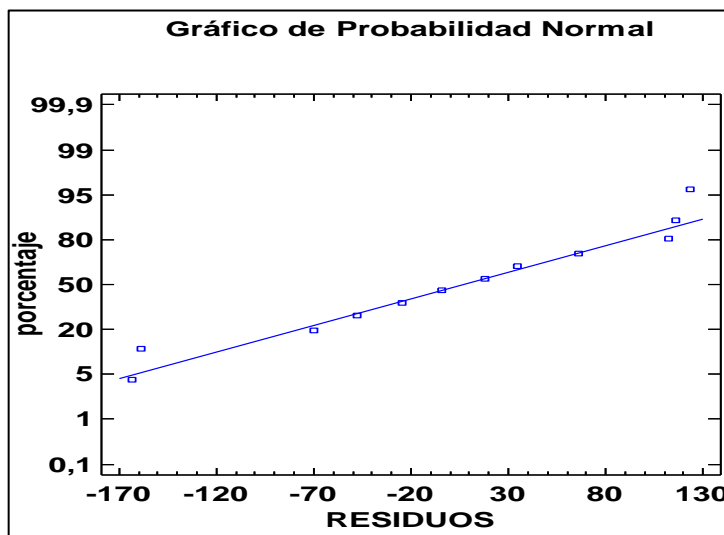
Resumen Estadísticos de los errores de Observación de pH	
Recuento	12
Promedio	0
Mediana	0,11
Desviación Estándar	0,797968
Coeficiente de Variación	8,62494E18%
Mínimo	-1,085
Máximo	1,315
Rango	2,4
Sesgo Estandarizado	-0,0217097
Curtosis Estandarizada	-0,84374

Resumen Estadísticos de los errores de Observación de potencial de óxido reducción	
Recuento	12
Promedio	-0,0000416667
Mediana	6,695
Desviación Estándar	98,4397
Coeficiente de Variación	-2,36255E8%
Mínimo	-163,743
Máximo	122,937
Rango	286,68
Sesgo Estandarizado	-0,592676
Curtosis Estandarizada	-0,522633
Resumen Estadísticos de los errores de Observación de Temperatura	
Recuento	12
Promedio	0
Mediana	0,5345
Desviación Estándar	4,46379
Coeficiente de Variación	-2,41237E19%
Mínimo	-6,6435
Máximo	8,3245
Rango	14,968
Sesgo Estandarizado	-0,0709781
Curtosis Estandarizada	-0,124806

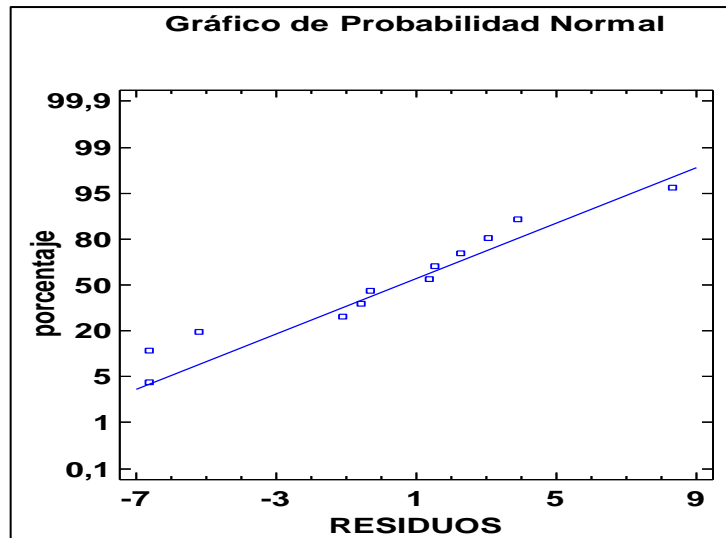
Los datos estadísticos que se muestran en la siguiente tabla resumen para residuos (errores de la observación) incluyen medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. Siendo el principal objeto de interés el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales se utilizan para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. En este caso los valores se encuentran en el rango de -2 a +2 indicando que se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. A continuación se presenta la gráfica que evidencia la normalidad de estos datos.



Distribución normal de los residuos estadísticos del pH. Fuente: Statgraphics Centurion XVI



Distribución normal de los residuos estadísticos del potencial de Oxido reducción. Fuente: Statgraphics Centurion XVI



Distribución normal de los residuos estadísticos de la temperatura. Fuente: Statgraphics Centurion XVI

- **Análisis de la homogeneidad de las varianzas**

El grafico de dispersión de residuos vs predichos que se muestra continuación presenta una nube de puntos sin patrón alguno. Los cual manifiesta una homogeneidad de varianzas.

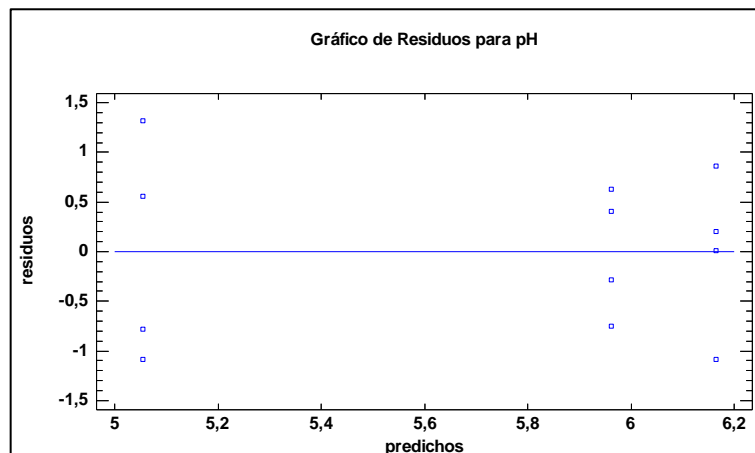


Gráfico de dispersión de residuos vs predichos de los datos de pH. Fuente: Statgraphics Centurion XVI

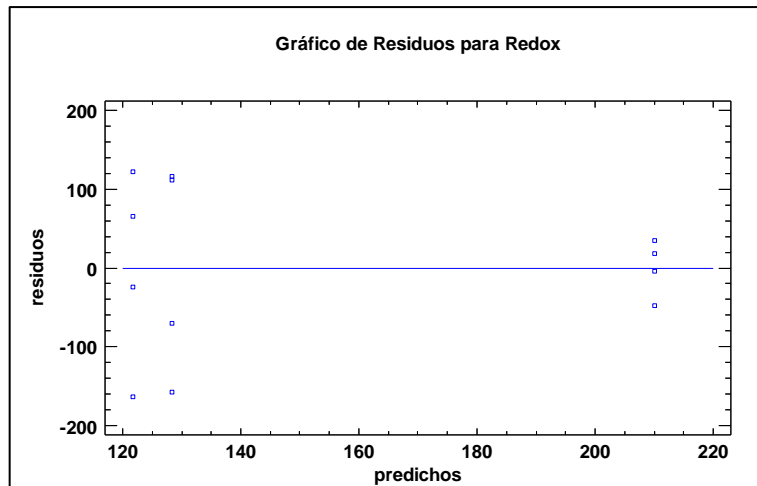


Gráfico de dispersión de residuos vs predichos de los datos de potencial de Oxido reducción. Fuente: Statgraphics Centurion XVI

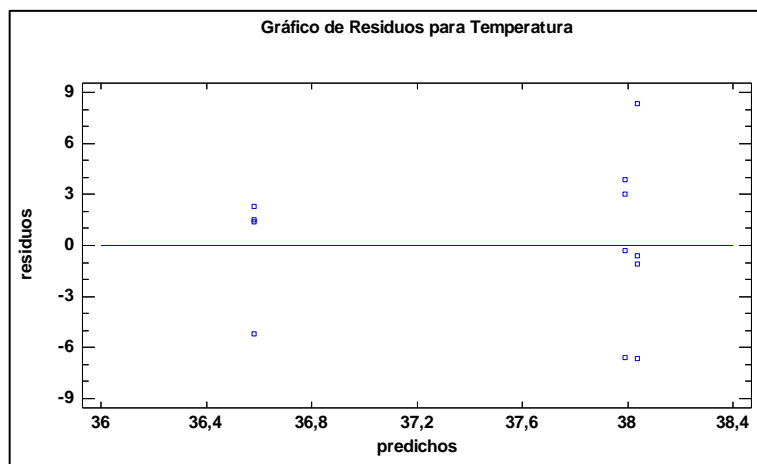
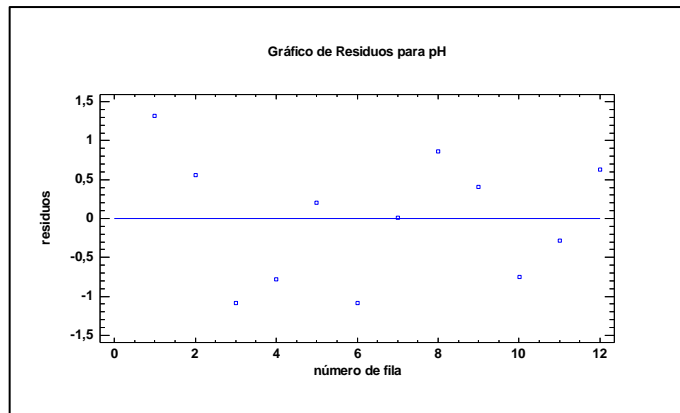


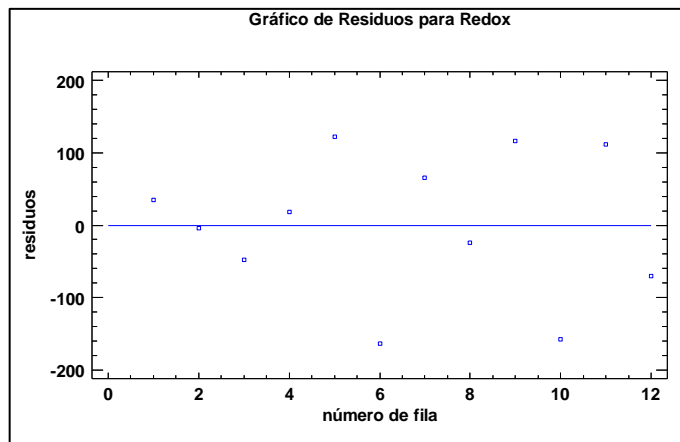
Gráfico de dispersión de residuos vs predichos de los datos de Temperatura

- **Análisis de Independencia**

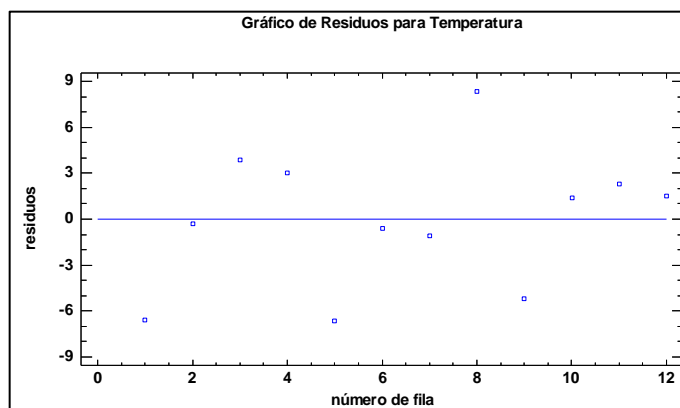
Al igual para la verificación de la homocedasticidad se tiene en cuenta los errores de observación para determinar si existe independencia entre estos datos. Para ello, se analiza la siguiente gráfica que relaciona estos residuos con la secuencia de los datos para verificar que la toma de datos corresponda a un mecanismo de recolección secuencial. La falta de un patrón manifiesta en el comportamiento de los residuos evidencia una independencia en los datos.



Gráfica de residuos vs la secuencia para los datos de pH. Fuente: Statgraphics Centurion XVI



Gráfica de residuos vs la secuencia para los datos de potencial de óxidor educación. Fuente: Statgraphics Centurion XVI



Gráfica de residuos vs la secuencia para los datos de Temperatura. Fuente: Statgraphics Centurion XVI.

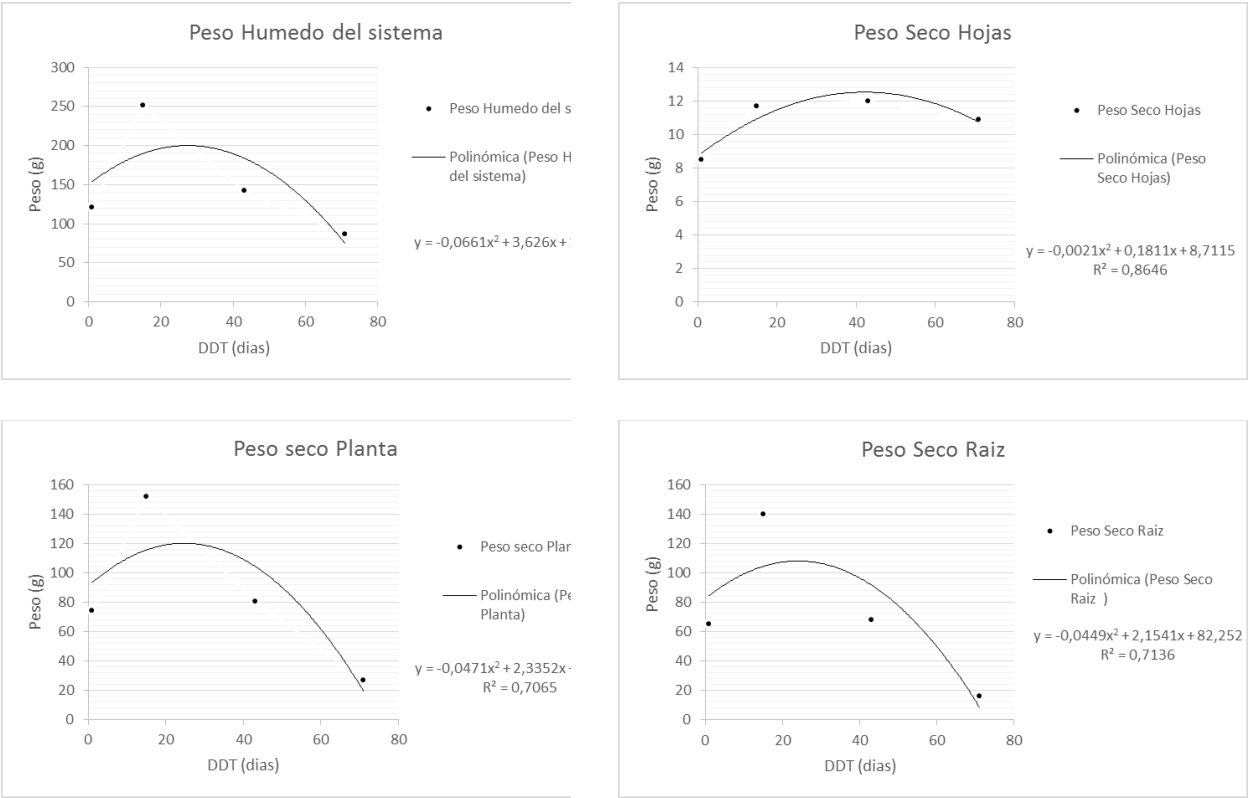
ANEXO E. Correlación de las variables medidas para el análisis de crecimiento de la especie vegetal.

ESPECIE VEGETAL	VARIABLE	ECUACIÓN	R ²
<i>T. latifolia</i>	Peso fresco de la planta	$y = -46,713X^2 + 212,43X - 30,243$	0,7179
	Peso seco de la planta	$y = -31,724X^2 + 136,59X - 31,173$	0,8231
	Peso seco de las raíces	$y = -0,0449x^2 + 2,1541x + 82,252$	0,7136
	Peso seco de las hojas	$y = -0,0021x^2 + 0,1811x + 8,7115$	0,8646


ANEXO F. Resumen de índices de crecimiento de la *T. latifolia* en el sistema de tratamiento.

ESPECIE VEGETAL	DDT	TCR	TAC
<i>T. latifolia</i>	(Días)	($\frac{g}{dia}$)	($\frac{g}{dia}$)
	1 - 15	0,051	5,568
	15 - 43	-0,023	-1,903
	43- 71	-0,039	-2,561

ANEXO G. Graficas de las correlaciones de las variables que se emplearon para el análisis de crecimiento de la *T. latifolia* en el sistema de tratamiento



ANEXO H. Informe de resultados de hidrocarburos totales de petróleo del laboratorio de toxicología y gestión ambiental de la Universidad de Córdoba

 NIT 891080081-3	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA INFORME DE RESULTADOS LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL	CODIGO: FTX-002
		22-11-2011
	VERSIÓN: Nº 01	

Cons. N°: 17-053

CUENTE:	GABRIEL CAMPO DAZA	SOLICITADO POR: GABRIEL CAMPO DAZA
CONVENIO/PROYECTO:	-	
TIPO DE MUESTRA:	AGUAS	
TOTAL MUESTRAS:	16	
RESPONSABLES DE MUESTREO:	CLIENTE	RECEPCIÓN EN LABORATORIO: S.B.
FECHA DE MUESTREO:	RESPONSABLES DE ANÁLISIS:	D.M.
FECHA RECEPCIÓN MUESTRAS:	14/12/2016; 20/12/2016; 17/01/2016; 15/02/2016	
límite de detección del método (LDM): 0,02µg/mL para cada HC	MÉTODO DE ANÁLISIS: EPA 3510C; EPA8015C - GC-MS	

HIDROCARBUROS AROMÁTICOS SATURADOS													
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	NONANO	DECANO	UNDECANO	DODECANO	TETRADECANO	HEXADECANO	OCTADECANO	EICOSANO	TETRACOSANO	OCTACOSANO	DOTRIACONTANO	TETRACONTANO
		µg/mL											
TX-141215-64	MUESTRA AGUA CONTAMINADA CON BORRA	6,45	4,78	22,97	64,24	90,60	193,39	2018,64	162,90	111,98	13,30	ND	ND
TX-201216-01	SPCN	ND	ND	0,85	9,48	40,85	274,17	2870,54	253,70	177,38	24,59	13,05	7,05
TX-201216-02	CPCN	ND	ND	ND	2,28	21,45	147,48	1806,16	136,39	91,07	11,87	9,08	ND
TX-201216-03	CPSN	ND	ND	0,30	6,01	20,36	94,70	1239,70	99,11	60,33	10,32	ND	ND
TX-201216-04	MUESTRA B	ND	ND	0,50	15,00	37,82	105,85	1182,48	96,81	58,14	8,84	ND	ND
TX-201216-05	SPSN	ND	ND	<0,02	3,40	8,71	42,15	620,59	45,44	27,50	6,76	ND	ND
TX-170117-01*	CPSN	ND	ND	ND	ND	9,27	217,48	2153,81	191,21	147,38	41,20	6,57	ND
TX-170117-02*	BLANCO	ND	ND	ND	ND	48,21	343,92	2484,53	195,97	146,26	74,27	16,44	ND
TX-170117-03*	SPCN	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<0,02	<0,02	ND	ND	ND	ND
TX-170117-04*	CPCN	ND	ND	ND	ND	0,09	2,53	76,93	8,21	5,59	1,60	2,10	ND
TX-170117-05*	SPSN	ND	ND	0,86	6,25	17,15	124,39	1583,73	142,24	100,31	22,06	2,18	ND
TX-150217-01	SN SP	ND	ND	ND	8,16	8,31	8,00	23,84	28,09	25,72	45,53	ND	ND
TX-150217-02	SN CP	ND	ND	ND	ND	0,09	0,15	0,46	0,45	0,39	0,46	ND	ND
TX-150217-03	BLANCO	ND	ND	ND	1,06	1,09	1,58	4,07	3,88	3,64	5,91	ND	ND
TX-150217-04	CNCP	ND	ND	ND	ND	8,17	5,54	12,62	17,35	21,16	45,12	ND	ND
TX-150217-05	CN SP	ND	ND	ND	ND	8,17	5,65	14,89	20,10	22,85	45,11	ND	ND



NIT 891080031-3

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
INFORME DE RESULTADOS
LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN
AMBIENTAL

CODIGO:
FTX-002

22-11-2011

VERSIÓN:
Nº 01

Hidrocarburos totales del petróleo (HTP – DRO+GRO) corresponden a hidrocarburos con masas entre C10 y C28 (GRO: gama de alcanos de C6 a C10 y cubre un Rango de punto de ebullición de aproximadamente 60°C-170°C. DRO: rango de alcanos de C10 a C28 y que cubre un rango de punto de ebullición de aproximadamente 170°C-430°C) típicos en perfiles de gasolina y Diesel.

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	DRO+GRO (µg/L)
TX-141215-64	MUESTRA AGUA CONTAMINADA CON BORRA	77720,56
TX-201216-01	SPCN	51879,26
TX-201216-02	CPCN	220697,21
TX-201216-03	CPSN	18608,88
TX-201216-04	MUESTRA B	19421,08
TX-201216-05	SPSN	8949,44
TX-170117-01*	CPSN	45615,57
TX-170117-02*	BLANCO	66944,73
TX-170117-03*	SPCN	256,39
TX-170117-04*	CPCN	3382,17
TX-170117-05*	SPSN	67746,04
TX-150217-01	SNSP	6237,84
TX-150217-02	SNCP	12612,92
TX-150217-03	BLANCO	7621,46
TX-150217-04	CNCP	3938,31
TX-150217-05	CNSP	4538,37

Nota importante: Los resultados presentados en este informe son válidos únicamente para las muestras analizadas; son de carácter confidencial y de propiedad del cliente. El laboratorio asegura la confidencialidad de los resultados presentados en este informe. El Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental no se hace responsable del método de obtención de la muestra ni sus condiciones antes de recibirla; cuando estos procedimientos no estuvieran a cargo del personal del laboratorio, por tanto, en estos casos no se harán interpretaciones con respecto a la representatividad o validez de las muestras.


JOSÉ LUIS MARRUGO NEGRÓN

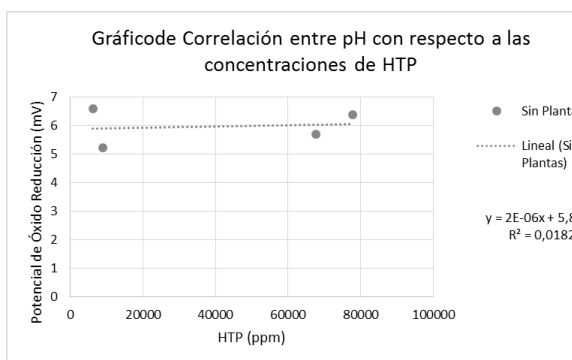
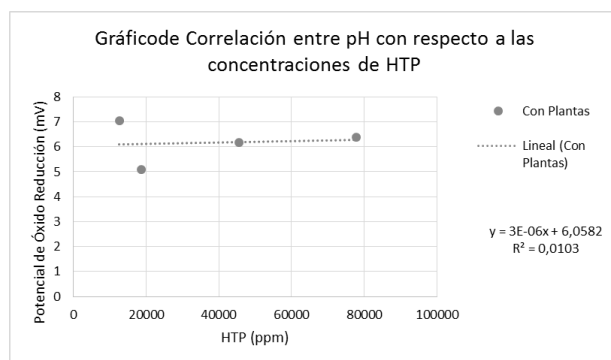
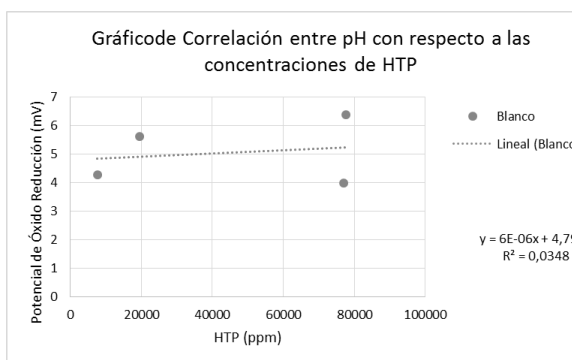
Director Laboratorio de
Toxicología y Gestión

ANEXO I. Resumen de los resultados de laboratorio de la determinación de hidrocarburos totales de petróleo

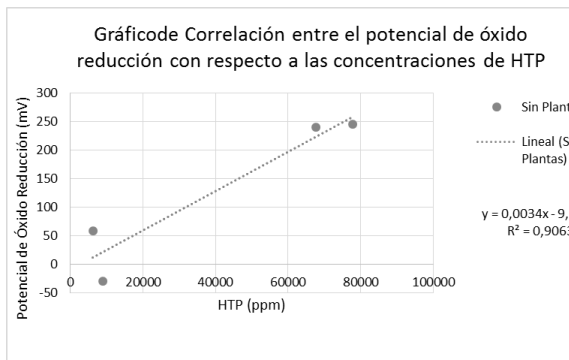
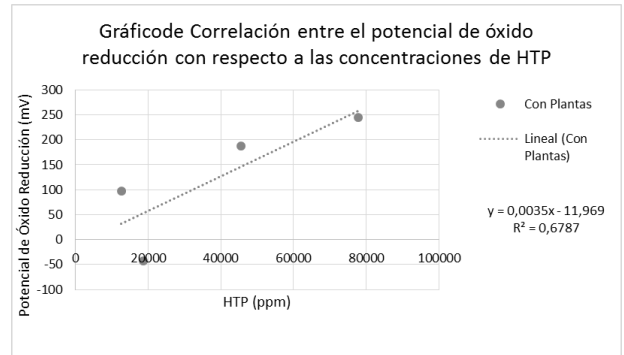
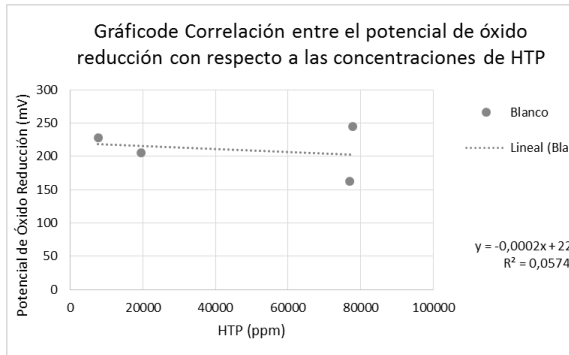
HIDROCARBUROS TOTALES DE PETROLEO ($\mu g * ml^{-1}$)			
Muestreo	Blanco	Con planta	Sin planta
1	77720,56	77720,56	77720,56
2	19421,08	18608,88	8949,44
3	11947,68	13172,88	7807,71
4	7621,46	12612,92	6237,84

ANEXO J. Graficas de correlación entre la concentración de HTP con respecto a las variables fisicoquímicas

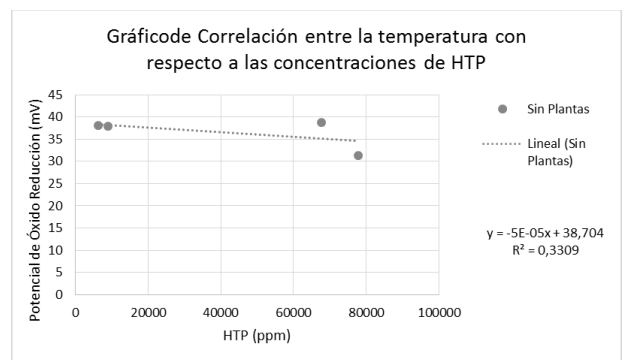
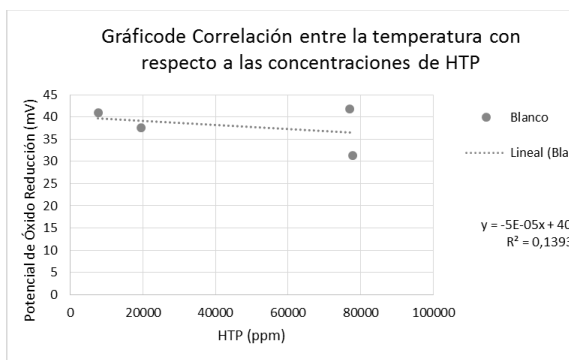
Gráfica de correlación entre pH y HTC de los sistemas de tratamiento Blanco, Sin plantas y Con plantas respectivamente

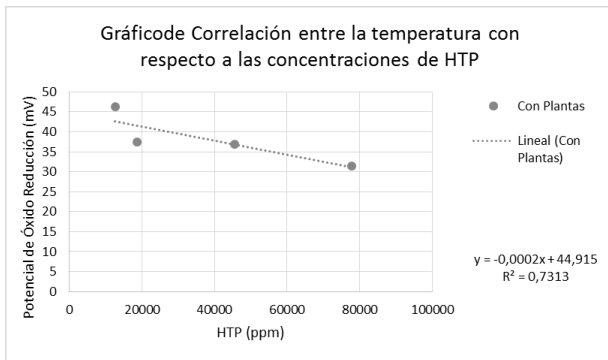


Gráfica de correlación entre el potencial de óxido reducción y HTC de los sistemas de tratamiento Blanco, Sin plantas y Con plantas respectivamente



Gráfica de correlación entre la temperatura y HTC de los sistemas de tratamiento Blanco, Sin plantas y Con plantas respectivamente.





ANEXO K. Imágenes de los montajes de los sistemas de tratamiento

Imágenes de los montajes de los sistemas de tratamiento con sus respectivos sistemas de recolección de la muestra





Imágenes de la recolección de las muestras de la planta (*T. latifolia*) en su ambiente natural y toma de la muestra de residuos líquidos de combustible.





Imágenes del análisis del peso seco de la planta





ANEXO L. Tabla de costos realizados para la construcción y mantenimiento de cada uno de los sistemas de tratamiento y tabla de efectividad en cada uno de los sistemas.

COSTOS DE HUMEDAL PLANTADO			
Producto	Valor Unidad	Unidades	Subtotal
Transporte Humedales unicolor - taller	\$ 14.000	2	\$ 28.000
Tubo Presión 1/2' (m)	\$ 1.400	3,5	\$ 4.900
Tapón roscado 1 1/2 '	\$ 4.200	4	\$ 16.800
Grava (Lata)	\$ 5.000	70	\$ 350.000
Transporte de grava	\$ 50.000	1	\$ 50.000
Tubo Presión 1/2' (und)	\$ 6.800	3	\$ 20.400
Tubo Presión 1/2' (m)	\$ 1.400	2	\$ 2.800
Humedal	\$ 1.200.000	1	\$ 1.200.000
Análisis HTC	\$ 150.000	3	\$ 450.000
Siembra de Plantas	\$ 20.000	4	\$ 80.000
Mantenimiento	\$ 20.000	2	\$ 40.000
IVA			\$ 426.151
Total			\$ 2.242.900

COSTOS DE HUMEDAL SIN PLANTAS			
Producto	Valor Unidad	Unidades	Subtotal
Transporte Humedales unicolor - taller	\$ 14.000	2	\$ 28.000
Tubo Presión 1/2' (m)	\$ 1.400	3,5	\$ 4.900
Tapón roscado 1 1/2 '	\$ 4.200	4	\$ 16.800
Grava (Lata)	\$ 5.000	70	\$ 350.000
Transporte de grava	\$ 50.000	1	\$ 50.000
Tubo Presión 1/2' (und)	\$ 6.800	3	\$ 20.400
Tubo Presión 1/2' (m)	\$ 1.400	2	\$ 2.800
Humedal	\$ 1.200.000	1	\$ 1.200.000
Análisis HTC	\$ 150.000	3	\$ 450.000
Mantenimiento	\$ 10.000	2	\$ 20.000
IVA			\$ 407.151
Total			\$ 2.142.900

COSTOS DE HUMEDAL BLANCO			
Producto	Valor Unidad	Unidades	Subtotal
Transporte Humedales unicolor - taller	\$ 14.000	2	\$ 28.000
Tubo Presión 1/2' (m)	\$ 1.400	3,5	\$ 4.900
Tapón roscado 1 1/2 '	\$ 4.200	4	\$ 16.800
Tubo Presión 1/2' (und)	\$ 6.800	3	\$ 20.400
Tubo Presión 1/2' (m)	\$ 1.400	2	\$ 2.800
Humedal	\$ 1.200.000	1	\$ 1.200.000
Análisis HTC	\$ 150.000	4	\$ 600.000
IVA			\$ 355.851
Total			\$ 1.872.900

EFFECTIVIDAD DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE HIDROCARBUROS TOTALES DE PETROLEO			
Muestreo	Blanco	Cp	Sp
1	77720,56	77720,56	77720,56
2	19421,08	18608,88	8949,44
3	11947,68	13172,88	7807,71
4	7621,46	12612,92	6237,84
$\Delta[HTC_{out}]$	70099,1	65107,64	71482,72